

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI  
WARSZAWA-MIEDZESZYN

**BIULETYN**

**INFORMACYJNY**

**5(156)**

**1977**

MINISTERSTWO ŁĄCZNOŚCI

---

# BIULETYN INFORMACYJNY

ROK 17

WARSZAWA 1977

NR 5/156/

---

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI  
Branżowy Ośrodek  
Informacji Naukowo-Technicznej i Ekonomicznej

Redakcja Biuletynu Informacyjnego

---

Redaktor Naczelny - prof. mgr inż. Lesław Kędziński

Z-ca Redaktora Naczelnego - dr inż. Krystyn Plewko

Redaktorzy działów:

mgr inż. Władysław Cetner, doc. mgr inż. Adam Moniuszko

Adres Redakcji:

Instytut Łączności

Branżowy Ośrodek

Informacji Naukowo-Technicznej i Ekonomicznej

Warszawa-Miedzeszyn, ul. Szachowa 1

NA PRAWACH RĘKOPISU - DO UŻYTKU SŁUŻBOWEGO

Redaktor: J. Borkowska

Montaż tekstu: B. Drabik

---

Dział Wydawniczy Instytutu Łączności  
Format B5. Nakład 675. Wpłynęło do  
Działu Wydawniczego 16.11.1976 r.  
Druk ukończono w lutym 1977 r.

Wacław Lisicki

ZAGADNIENIA PROPAGACJI FAL MIĘDZY ZIEMIĄ  
I PRZESTRZENIĄ KOSMICZNĄ

SPIS TREŚCI

	Str.
1. Wprowadzenie	1
2. Wpływ troposfery na fale radiowe w relacji Ziemia - Kosmos	3
2.1. Ogólny przegląd problematyki	3
2.2. Wpływ refrakcji troposferycznej	4
2.3. Scyntyllacje i zaniki przy braku opadów	5
2.4. Absorpcja molekularna w troposferze	6
2.5. Tłumienie wywołane przez opady atmosferyczne	7
2.6. Tłumienie wywoływane przez mgłę i chmury	9
2.7. Pomiary tłumienia opadowego i molekularnego	10
2.8. Zastosowanie odbioru zbiorczego przestrzennego	11
2.9. Czas przejścia fali na trasie Ziemia - Kosmos	12
2.10. Ograniczenia szerokości pasma w systemach łączności kosmicznej	12
2.11. Zagadnienia różne	13
3. Wpływ jonosfery na fale radiowe w relacji Ziemia - Kosmos	13
3.1. Ogólny przegląd problematyki	13
3.2. Scyntyllacje	14
3.3. Absorpcja jonosferyczna	16
3.4. Wpływ refrakcji i zmiany kąta przychodzenia fali	17
3.5. Czas propagacji grupowej	18
3.6. Zagadnienia różne	19
4. Warunki odbioru radiowego na księżycu	19
5. Zagadnienia propagacyjne istotne z punktu widzenia radiodyfuzji satelitarnej	20
5.1. Zakres problematyki	20
5.2. Propagacyjne właściwości zakresów częstotliwości przewidzianych dla radiodyfuzji satelitarnej	21
5.3. Tłumienie troposfery w zakresie 12 GHz	22
Wykaz literatury	23

## ZAGADNIENIA PROPAGACJI FAL MIĘDZY ZIEMIĄ I PRZESTRZENIĄ KOSMICZNĄ

### 1. WPROWADZENIE

Na wstępie trzeba wyjaśnić, co należy rozumieć pod wymienionym w tytule pojęciem przestrzeni kosmicznej. W szczególności chodzi o ustalenie, na jakiej wysokości nad powierzchnią Ziemi znajduje się "dolna" granica obszaru, do którego można już zastosować nazwę przestrzeni kosmicznej. Na sprawę tę można spojrzeć z różnych punktów widzenia.

Traktując zagadnienie granicy kosmosu najbardziej ogólnie, można by uważać, że biorąca udział w ruchu obrotowo-postępowym Ziemi atmosfera jeszcze do niej przynależy, natomiast nadzwyczaj rozrzedzony gaz międzygwiazdny nie jest z Ziemią związany, wobec czego strefę graniczną stanowi obszar przejściowy pomiędzy tymi środowiskami. Tak pojęta granica przestrzeni kosmicznej byłaby jednak mało ściśle określona, ponieważ obszar przejściowy jest ogromnie rozległy i do tego jeszcze niestabilny w czasie. Przyjęto zatem na ogół uważać za przestrzeń kosmiczną obszar znajdujący się powyżej warstw atmosfery wywierających zauważalne działanie hamujące na sztuczne satelity Ziemi i inne obiekty kosmiczne. Ta dość dowolnie określona wysokość graniczna jest przez różnych autorów różnie podawana, przez niektórych 1000 km [1], przez innych nawet tylko 100 km [2].

Z punktu widzenia łączności radiowej powyższe kryterium graniczne nie ma istotnego znaczenia. Ważne jest raczej, w jakim środowisku propagacji znajduje się obiekt pełniący rolę korespondenta w stosunku do stacji naziemnej i przez jakie środowiska fale radiowe muszą przechodzić. Jeżeli obiekt znajduje się w głębokim Kosmosie, to na propagację fal na trasie między stacją naziemną i stacją pokładową na obiekcie kosmicznym wywiera wpływ kilka środowisk o odmiennych właściwościach. Fale radiowe przechodzą przez troposferę, jonosferę, egzosferę i dalej przez obszar gazu międzygwiazdowego. Ponadto na propagację fal może oddziaływać powierzchnia Ziemi w rejonie stacji naziemnej oraz ewentualnie powierzchnia i atmosfera innego globu, jeżeli stacja kosmiczna znajdzie się na tej powierzchni lub w pobliżu.

Obiekt, z którym stacja naziemna utrzymuje łączność, nie necessarily musi znajdować się w przestrzeni kosmicznej, rozumianej tak, jak została ona zdefiniowana na wstępie, a pomimo to łączne ma wszelkie cechy charakterystyczne dla łączności Ziemia - Kosmos. Często apogeum satelity nie wykracza poza jonosferę, więc

orbita całkowicie zamyka się w obrębie atmosfery ziemskiej. Jednakże z punktu widzenia wpływów propagacyjnych łączność z takim satelitą przedstawia podobne problemy, jak w przypadku łączności na przykład z satelitą geostacjonarnym znajdującym się daleko poza atmosferą ziemską.

Problematyka związana z propagacją fal między Ziemią i przestrzenią kosmiczną jest bardzo obszerna. Wiele zagadnień pozostaje jeszcze otwartych. Ponieważ w każdym przypadku łączności pomiędzy stacją naziemną a stacją na sztucznym satelicie lub innym obiekcie kosmicznym fale radiowe przechodzą przez troposferę i jonosferę, skoncentrujemy się przede wszystkim na zagadnieniach wpływu tych środowisk na propagację. Omówimy też krótko warunki propagacji fal na Księżycu w związku z odbiorem sygnałów z Ziemi przez radiostacje czasowo instalowane na powierzchni tego globu oraz nadawanie sygnałów przez te radiostacje w kierunku Ziemi.

Wspomniano powyżej o troposferze i jonosferze, jako tych środowiskach, które wywierają dominujący wpływ na propagację fal w relacji Ziemia-Kosmos. Warto tu przypomnieć, że definicje troposfery i jonosfery są oparte na dwóch zupełnie różnych podziałach atmosfery ziemskiej na warstwy /rys. 2-1/<sup>x/</sup>. Ze względu na pionowy rozkład temperatury wyodrębnia się, licząc kolejno od powierzchni Ziemi, troposferę, stratosferę, mezosferę i termosferę. Natomiast z punktu widzenia właściwości elektrycznych atmosferę dzieli się na obojętną elektrycznie neutrosferę oraz zawierającą naładowane cząsteczki i swobodne elektrony jonosferę.

W ramach pierwszego podziału istotny dla propagacji fal radiowych jest tylko wpływ troposfery, sięgającej do wysokości kilkunastu kilometrów. W ramach drugiego podziału bardzo duże znaczenie ma jonosfera, która rozpościera się nad powierzchnią Ziemi, począwszy od wysokości ok. 60 km. Wynika stąd, że niezależnie od przyjętych kryteriów podziału atmosfery, troposfera i jonosfera stanowią całkowicie odrębne środowiska o właściwych dla siebie sposobach oddziaływania na fale radiowe.

Przez atmosferę ziemską przenikają stosunkowo z małym tłumieniem fale w dwóch szerokich zakresach częstotliwości: od ok. 100 MHz do ok. 20-30 GHz oraz od ok. 1 THz do ok. 10 THz /promieniowanie podczerwone/. Są to tzw. "okna" atmosfery ziemskiej. Na obecnym etapie rozwoju łączności kosmicznej wykorzystuje się ten niższy zakres. Ze względów technicznych i propagacyjnych zarazem za optymalny obecnie można uważać zakres fal centymetrowych 3 - 30 GHz.

<sup>x/</sup> Rysunki są zamieszczone na końcu artykułu.

## 2. WPŁYW TROPOSFERY NA FALE RADIOWE W RELACJI ZIEMIA - KOSMOS

### 2.1. Ogólny przegląd problematyki

Zagadnienia wpływu troposfery na propagację fal w relacji Ziemia-Kosmos w znacznej mierze pokrywają się z problematyką propagacji troposferycznej na trasach ziemskich. Można jednak wyodrębnić spośród nich problematykę szczególnie istotną dla łączności kosmicznej. Postulowane kierunki badań precyzują programy studiów CCIR.

W programie Studiów 5C-2/5 [3] wymienione są dane propagacyjne potrzebne do projektowania systemów łączności kosmicznej:

- rozkład czasowy tłumienia fali, częstotliwość zaników, scyntyllacje, rozbieżność wiązki, niekoherentność czoła fali;
- rozkład czasowy szumów generowanych przez gazy atmosferyczne, opady i chmury;
- zależność ww rozkładów od częstotliwości, kąta elewacji, sytuacji geograficznej i składu atmosfery;
- metody prognozowania powyższych rozkładów i zależności;
- skutki wymienionych wpływów troposfery na działanie systemów łączności kosmicznej z uwzględnieniem zakłóceń od innych stacji;
- możliwości stosowania odbioru zbiorczego przestrzennego i innych środków technicznych zmniejszających skutki tłumienia i szumów wywoływanych przez opady i chmury;
- ograniczenie przestrzennej powtarzalności częstotliwości przy stosowaniu polaryzacji ortogonalnych, powodowane przez opady i wielodrogowość sygnałów.

Program Studiów 5D-2/5 [4] precyzuje kierunki prac badawczych, jakie powinny być prowadzone pod kątem widzenia współużytkowania tych samych zakresów częstotliwości przez służby radiokomunikacyjne ziemskie i naziemne stacje satelitarne. Najważniejsze kierunki są następujące:

- opracowanie metody obliczania poziomów sygnału zakłócającego przekraczanych w 0,005, 0,01, 0,1, 1 i 20% czasu, z uwzględnieniem absorpcji i rozproszenia opadowego, absorpcji molekularnej, odbić fali od samolotów itp.
- określenie skumulowanych rozkładów median godzinnych w okresach rocznych lub w najmniej korzystnych miesiącach /zakłócenia na najwyższym poziomie/, amplitud i czasu trwania zaników wywoływanych przez propagację duktową, rozproszenia opadowe i odbicia od samolotów;

- opracowanie podziału świata na rejony klimatyczne o standardowych parametrach meteorologicznych;
- możliwości i skutki stosowania anten o bardzo dużym zysku na stacji naziemnej przy jednoczesnym stosowaniu anten o bardzo małym zysku na obiekcie kosmicznym.

Program Studiów 5E-2/5 [5] koncentruje uwagę na rozproszeniu opadowym, jako jednej z przyczyn wzajemnych zakłóceń pomiędzy łączami ziemskimi a łączami Ziemia - Kosmos. Postulowane są następujące badania:

- określenie zakresu kątów i odległości, w których rozproszenie opadowe może wywoływać wzajemne zakłócenia między stacjami pracującymi na częstotliwościach powyżej 1 GHz;
- określenie średnich rozkładów czasowych i przestrzennych obserwowanych wartości skutecznego przekroju rozproszenia w funkcji wysokości nad ziemią, pory dnia, sezonu i rejonu klimatycznego;
- próba znalezienia prostej zależności pomiędzy przekrojem rozproszenia a intensywnością opadów;
- opracowanie metody obliczania poziomu zakłóceń ze szczególnym uwzględnieniem przypadków, gdy wiązki anten stacji mikrofalowych nie przecinają się.

## 2.2. Wpływy refrakcji troposferycznej

Jak wiadomo, zmiana wartości wskaźnika refrakcji powoduje odchylenie toru fali od pierwotnego kierunku. Jest to szczególnie istotne w łączach satelitarnych pracujących przy małych kątach elewacji.

Obserwuje się, że najsilniejsze zakrzywienia toru fali przechodzącej przez troposferę występują w warstwach atmosfery najbliższych powierzchni Ziemi, odznaczających się największą gęstością i niestabilnością. Różnica między rzeczywistym i pozornym kątem elewacji szybko maleje, gdy satelita porusza się w kierunku od horyzontu do zenitu. W Sprawozdaniu 234-3 CCIR [6] podano przykładowo, że przy bardzo dużej wartości  $N_s = 450^{x/}$  poprawka na kąt elewacji przy jego zmianie od  $0^\circ$  do  $3^\circ$  maleje z 32 do 5 miliradianów [7].

Im ostrzejsza jest wiązka anteny stacji naziemnej, tym większe stają się wymagania dotyczące dokładności nakierowania anteny na satelitę. Model propagacyjny oparty na znajomości rozkładu wskaźnika refrakcji na powierzchni Ziemi i na wysokości 1 km jest dla tych celów niewystarczający. Potrzebne są pomiary wskaźnika refrakcji w funkcji wysokości, przynajmniej dla kątów elewacji mniejszych od  $10^\circ$ , jeżeli wymaga się, aby błąd w obliczeniu kąta elewacji nie przekraczał

$x/N_s$  - wskaźnik refrakcji na powierzchni Ziemi.



$10^{-4}$  radiana w ciągu 99,5% czasu. W zakresie kątów elewacji od  $10^\circ$  do  $50^\circ$  wystarcza korekcja określona na podstawie modelu propagacji troposferycznej opisanego w Sprawozdaniu 563 CCIR [8], powszechnie stosowanego do linii radiowych ziemskich. Dla kątów elewacji powyżej  $50^\circ$  korekcja w ogóle nie jest potrzebna.

Pośrednim skutkiem zmiennej refrakcji może być też rozogniskowanie atmosferyczne, polegające na niewielkiej na ogół dekoncentracji wiązki anteny, w konsekwencji czego występuje dodatkowe tłumienie sygnału. Wyniki badań [9, 10] wskazują, że tłumienie rozogniskowania jest niezależne od częstotliwości i nie przekracza 0,4 dB przy kącie elewacji  $3^\circ$ .

Podobnym w skutkach zjawiskiem jest niekoherentność czoła fali wywołana przez turbulencyjne zmiany wskaźnika refrakcji. Niekoherentność objawia się przede wszystkim w antenach o dużych aperturach, powodując pewne zmniejszenie zysku. Efekt ten maleje ze wzrostem kąta elewacji, ale rośnie ze wzrostem częstotliwości. Przeprowadzone pomiary [10] wykazały, że przy kącie elewacji  $5^\circ$  straty wynoszą ok. 0,2 dB na 4 GHz i są nieco większe na 6 GHz.

W porównaniu ze stratami występującymi w łącach Ziemia - Kosmos skutek oddziaływania gazów atmosferycznych i opadów straty powodowane przez rozogniskowanie i niekoherentność czoła fali są nieznaczne i zjawiska te mają znaczenie drugorzędne.

### 2.3. Scyntyllacje i zaniki przy braku opadów

Małe nieregularne zmiany wskaźnika refrakcji wywołują szybkie zmiany amplitudy, fazy i kąta przychodzenia fali. Zjawiska te są określane nazwą scyntyllacje /in. migotanie/. Scyntyllacje powstają zarówno w troposferze, jak i w jonosferze, o czym będzie mowa dalej.

W Sprawozdaniu 564 CCIR [11] stwierdza się, że wpływ scyntyllacji troposferycznych na działanie systemów łączności kosmicznej jest do pominięcia na częstotliwościach poniżej 20 GHz i przy dużych kątach elewacji. W zakresie większych częstotliwości i przy małych kątach elewacji scyntyllacje powodują zmniejszenie dokładności radioelektrycznych systemów śledzenia satelitów. W szczególności wpływ scyntyllacji zaznacza się na dużych szerokościach geograficznych przy łączności z satelitami geostacjonarnymi.

W Sprawozdaniu 234-3 CCIR podano przykładowo, że zaniki scyntyllacyjne fali odbieranej przez antenę paraboliczną o średnicy kilku metrów, przychodzącej ze źródła znajdującego się poza troposferą, były przy dobrej pogodzie rzędu  $+4$  dB na 100 GHz i  $+2$  dB na 35 GHz. Kąty elewacji przekraczały  $45^\circ$ . Przy kątach elewacji ok.  $10^\circ$  odpowiednie wartości dochodziły do  $+12$  i  $+6$  dB.

Przy bardzo małych kątach elewacji scyntyllacje troposferyczne objawiają się wyraźnie nawet na częstotliwościach poniżej 10 GHz. Badania prowadzone w Kana-

dzie na 7 GHz [12] wykazały, że przy kątach mniejszych od  $3^{\circ}$  głębokość zaników w porze letniej przekracza 8 dB w ciągu 1% czasu. W porze zimowej i w obszarze klimatu polarnego głębokość zaników jest znacznie mniejsza. Badania prowadzone w Japonii [10] na częstotliwościach 4 i 6 GHz oraz najnowsze badania kanadyjskie [13] wykazały niezależność od częstotliwości zaników powodowanych przez scyntyllacje przy bardzo małych kątach elewacji. Na podstawie wyników badań kanadyjskich zostały nawet sporządzone prowizoryczne krzywe głębokości zaników dla małych kątów elewacji i klimatu kontynentalnego umiarkowanego. CCIR zaleca jednak ostrożność w stosowaniu tych krzywych, szczególnie dla innych typów klimatu, jak również dla częstotliwości powyżej 10 GHz. Zagadnienie właściwej oceny głębokości zaników jest bardzo ważne dla projektantów systemów łączności Ziemia - Kosmos ze względu na konieczność zapewnienia dużej niezawodności służby, co wymaga stosowania dużych wartości współczynników zabezpieczających sygnał użyteczny przed zanikami i utrudnia rozwiązania projektowe.

Scyntyllacje mogą również powodować zmiany pozornego położenia stacji kosmicznej, widzianej ze stacji naziemnej. Ten efekt ma jednak znaczenie praktyczne tylko dla systemów antenowych o bardzo skupionych wiązkiach, pracujących bez śledzenia, pod kątami elewacji poniżej  $2^{\circ}$ .

#### 2.4. Absorpcja molekularna w troposferze

W zakresie częstotliwości powyżej 20 GHz występuje zjawisko absorpcji molekularnej fal radiowych w parze wodnej i w tlenie. Fizyczną przyczyną absorpcji jest wpływ energii fali na zewnętrzną powłokę elektronów w cząsteczkach wody i tlenu. Przejście elektronu z jednego poziomu energetycznego na drugi następuje przy określonych częstotliwościach, wobec czego zjawisko ma charakter rezonansowy. Maksima absorpcji objawiają się przy następujących częstotliwościach: 22,2 GHz /H<sub>2</sub>O/, 60 GHz /O<sub>2</sub>/, 120 GHz /O<sub>2</sub>/, 183 GHz /H<sub>2</sub>O/ i 330 GHz /H<sub>2</sub>O/.

Całkowitą absorpcję molekularną na trasie Ziemia - Kosmos oblicza się w następujący sposób:

$$A = \int_0^{r_0} [\gamma_{O_2}/r + \gamma_{W_2O}/r] dr \quad [dB] \quad /2-1/$$

gdzie:  $\gamma_{O_2}$  i  $\gamma_{W_2O}$  - współczynniki absorpcji tlenu i pary wodnej, odpowiednio, w dB/km.

Absorpcję całkowitą można wyrazić jeszcze za pomocą innego wzoru:

$$A = \gamma_{O_2} r_{CO} + \gamma_{W_2O} r_{CW} \quad [dB] \quad /2-2/$$

gdzie:  $\gamma_{O_2}$  i  $\gamma_{W_2O}$  - współczynniki absorpcji, odpowiednio tlenu i pary wodnej, określone na powierzchni Ziemi,

$r_{eo}$  i  $r_{ew}$  - równoważne długości trasy poprzez atmosferę.

Równoważna długość trasy  $r_{eo}$  jest to długość trasy fali radiowej przez atmosferę o stałej gęstości, rozciągającej się od powierzchni Ziemi do wysokości 4 km, powyżej której jest próżnia. Odpowiednia wysokość dla równoważnej trasy  $r_{ew}$  wynosi 2 km. Podane wartości nie są miarodajne dla klimatu tropikalnego.

Na rysunku 2-2 przedstawiony jest przebieg teoretycznej wartości tłumienia w funkcji częstotliwości, w zakresie od 1 do 160 GHz, dla tras pionowych i poziomych /początkowo/, przebiegających w atmosferze umiarkowanie wilgotnej /7,5 g/m<sup>3</sup> na powierzchni Ziemi/, wg Crane [9]. Dla dowolnego kąta elewacji w zakresie od 5° do 90° można określić tłumienie w pierwszym przybliżeniu, mnożąc wartość odpowiadającą trasie pionowej przez cosecans kąta elewacji [14].

Rysunek 2-3 przedstawia przebieg tłumienia w otoczeniu 60 GHz, dla tras pionowych, przy różnych zawartościach pary wodnej na poziomie morza. Częstotliwości bliskie 60 GHz są korzystne do stosowania w łączności między satelitami, gdyż silna absorpcja molekularna tłumi zakłócenia wzajemne ze stacjami na Ziemi [15].

Na rysunku 2-4 pokazany jest przebieg tłumienia na trasach zenitalnych, w atmosferze umiarkowanie wilgotnej i suchej, w zakresie częstotliwości od ok. 100 do 340 GHz.

## 2.5. Tłumienie wywołane przez opady atmosferyczne

Z punktu widzenia wpływu na propagację fal centymetrowych i krótszych opady atmosferyczne /deszcz, grad, śnieg/ i inne zbliżone zjawiska /mgła, opary/ określane są ogólną nazwą: hydrometeory. Fale o częstotliwościach poniżej ok. 6 GHz nie są praktycznie pochłaniane przez hydrometeory. Główną przyczyną pochłaniania fal o większych częstotliwościach jest rozproszenie energii w kropelkach deszczu lub mgły względnie w kryształkach lodu. W tych kropelkach powstają prądy przesunięcia i przy dostatecznie krótkiej fali odpromieniowują one energię w różnych kierunkach, pobieraną z przechodzącej fali, wskutek czego ulega ona osłabieniu.

Tłumienie w deszczu i we mgle określa się za pomocą współczynnika absorpcji w dB/km. Wartość tego współczynnika jest proporcjonalna do intensywności opadu, którą mierzy się ilością pochodzącej z opadu wody w mm/godz. Innym miernikiem jest wodność, czyli ciężar skondensowanej wody w gramach na 1 m<sup>3</sup>. W tabeli 2-1 podano dla orientacji średnie intensywności opadu i wodności, odpowiadające różnym rodzajom deszczu [1].

Rysunek 2-5 przedstawia zależność współczynnika absorpcji opadowej od częstotliwości w zakresie od 9 do 80 GHz dla ulewnego deszczu o intensywności 100 mm/godz.

Rodzaj deszczu	Intensywność opadu mm/godz.	Wodność g/m <sup>3</sup>
Mżawka	0,25	0,092
Lekki deszcz	1	0,14
Średni deszcz	4	0,28
Silny deszcz	15	0,83
Bardzo silny deszcz	40	1,9
Ulewa	100	5,4

Na ogół deszcz, w szczególności ulewny, nie występuje jednocześnie na całej trasie, a tylko na pewnym jej odcinku. Natężenie pola w warunkach opadu można obliczyć za pomocą następującego wzoru:

$$E = \frac{173 \sqrt{P_{pr}}}{d} \cdot 10^{-\frac{\sigma l}{20} \frac{n}{100}} \left[ \frac{mV}{m} \right] \quad /2-3/$$

gdzie:  $P_{pr}$  - moc promieniowana w kW,

$d$  - długość trasy w km,

$\sigma$  - współczynnik absorpcji w dB/km,

$l$  - długość odcinka trasy, na którym występuje opad w km

$n$  - intensywność opadu w mm/godz.

Przy obliczaniu tłumienia opadowego na trasie Ziemia - Kosmos trzeba brać pod uwagę przestrzenną nierównomierność rozkładu intensywności opadu wzdłuż trasy i wpływ kąta elewacji. Informacje na temat pionowego rozkładu intensywności deszczów są jeszcze zbyt skąpe, aby można było sformułować jakieś ogólne prawa. Stosuje się niekiedy empiryczną metodę "skutecznej odległości", w której rzeczywistą długość odcinka trasy przechodzącego przez obszar nierównomiernego opadu zastępuje się odpowiednią odległością, na której opad jest równomierny. Odległość skuteczną określa się na podstawie statystycznych danych rozkładu tłumienia wzdłuż rzeczywistych tras ukośnych i danych intensywności opadów na ziemi w pobliżu tych tras, zebranych w tym samym czasie. Wykorzystuje się przy tym teoretyczne zależności wiążące tłumienie z intensywnością opadu. Wstępne wyniki rozważań na temat zależności skutecznej odległości od kąta elewacji z intensywnością opadów jako parametrem zostały podane przez Yokoi i innych w 1973 roku [16]. Fang [17] podaje wzory pozwalające oszacować w pierwszym przybliżeniu tłumienia na trasach Ziemia - Kosmos w oparciu o dane z tras Ziemia - Ziemia.

W braku danych dotyczących opadów w konkretnym miejscu można zastępczo postu-  
giwać się ogólnymi danymi dla 5 stref klimatycznych ze Sprawozdania 563 CCIR [8].  
Rysunek 2-6 przedstawia wspomniane strefy klimatyczne, zaś rys. 2-7 daje staty-  
styczną informację odnośnie poziomu opadu przekraczanego w określonym procencie  
czasu. Zależność tłumienia od intensywności opadu i od częstotliwości jest przed-  
stawiona na rys. 2-8 wg Sprawozdania 233-3 /Rev.76/ CCIR [18].

Zależność odległości skutecznej od kąta elewacji dla 0,01% czasu została o-  
kreślona na podstawie badań Kinase i Kimpara, prowadzonych w Japonii i w Malezji  
[19, 20], oraz najnowszych badań Yokoi [21]. Krzywa określająca tę zależność  
przedstawiona jest na rys. 2-9 wg Sprawozdania 564 /Rev.76/[22].

W najnowszych pracach prowadzonych w Stanach Zjednoczonych [23, 24] podane  
są metody pozwalające na podstawie danych dla jednej częstotliwości, określone-  
go kąta elewacji i określonej polaryzacji, przejść do danych dla innych param-  
trów.

Stosunkowo bardzo mało informacji można znaleźć w literaturze na temat wpły-  
wu opadów śnieżnych i gradu. Ten ostatni jest zjawiskiem występującym względnie  
rzadko, a zatem z jednej strony trudno jest zebrać materiał statystyczny, a z  
drugiej strony wpływ na propagację fal rzadko pojawiającego się i normalnie krót-  
ko trwającego gradu jest mało istotny. Śnieg występuje wprawdzie znacznie czę-  
ściej, szczególnie w obszarach wysokich szerokości geograficznych, ale jego zna-  
czenie dla propagacji fal nie jest zbyt wielkie. Normalnie pochłanianie śniegu  
jest mniejsze, niż pochłanianie deszczu o takiej samej wodności.

## 2.6. Tłumienie wywoływane przez mgłę i chmury

Mgła składa się z bardzo drobnych kropelek o promieniu od 2 do ok. 60  $\mu\text{m}$ .  
Dla porównania można przytoczyć, że krople deszczu mają wymiary od ok. 60  $\mu\text{m}$  do  
ok. 7 mm. Natężenie mgły określa się zasięgiem widoczności lub wodnością. Cha-  
rakterystryki mgły podane są w tabeli poniżej.

T a b e l a 2-2

Charakterystyki mgły

Rodzaj mgły	Zasięg widoczności	Wodność w $\text{g/m}^3$
Rzadka mgła	600	0,03
Średnia mgła	120	0,3
Gęsta mgła	30	2,3

Absorpcję we mgle lub w chmurach określa się za pomocą wzoru:

$$A_c = K_1 M \quad \text{dB/km}$$

/2-4/

gdzie:  $K_1$  - współczynnik tłumienia w dB/km na  $g/m^3$ ,  
 $M$  - wodność w  $g/m^3$ .

Wartości współczynnika tłumienia mgły /chmury/ w funkcji częstotliwości wg Snidera [25] są podane na rys. 2-10.

Chmury utworzone z cząsteczek lodu powodują tłumienie o dwa rzędy wielkości mniejsze niż chmury wodne, ponieważ przenikalność dielektryczna lodu jest mniejsza niż wody. W praktyce to tłumienie można pomijać.

## 2.7. Pomiar tłumienia opadowego i molekularnego

Istnieje kilka metod pomiarów tłumienia na trasach Ziemia - Kosmos. Najbardziej bezpośrednia metoda polega na wykorzystaniu sygnałów nadawanych przez satelity. Możliwości te są jednak dość poważnie ograniczone pod względem wyboru miejsca, częstotliwości i kąta elewacji. Wykorzystanie samolotów wprawdzie uelastycznia powyższe możliwości wyboru, ale uzyskane wyniki przedstawiają mniejszą wartość jako materiał statystyczny. Szersze zastosowanie znalazły metody radiometryczne, wykorzystujące Słońce, jako źródło promieniowania oraz pomiary temperatury szumowej nieba. Wreszcie prowadzi się obserwacje za pomocą radaru meteorologicznego.

Pomiary radiometryczne wykorzystujące Słońce jako źródło promieniowania odznaczają się dużą dokładnością, ale są obciążone wpływem dobowego ruchu /pozornego/ Słońca. Ponieważ intensywne opady bynajmniej nie są równomiernie rozłożone w czasie, w ciągu doby, zatem materiał statystyczny zebrany z tych pomiarów, podobnie zresztą jak i przy wykorzystaniu satelitów niegeostacjonarnych, nie jest w pełni miarodajny.

Badania oparte na pomiarach temperatury szumowej nieba wykorzystują związek istniejący pomiędzy tą ostatnią wielkością i tłumieniem fali przechodzącej przez troposferę. Nagrzana atmosfera jest źródłem szumów. Intensywność promieniowania szumów molekularnych można charakteryzować równoważną temperaturą. Równoważna temperatura szumów atmosfery, czyli tzw. temperatura szumowa nieba w danym kierunku określona jest następującym wyrażeniem [6]:

$$T_s = \int_0^r \frac{T(r')}{r'} e^{-\int_0^{r'} \alpha(r'') dr''} dr' \quad /2-5/$$

gdzie:  $T/r/$  - temperatura środowiska w funkcji odległości  $r$ , w K,  
 $\alpha/r/$  - współczynnik absorpcji w  $km^{-1}$ , w funkcji  $r$ .

Zastępując temperaturę  $T/r/$  przez uśrednioną temperaturę  $T_m$ , można dojść do prostego wyrażenia wiążącego temperaturę z tłumieniem:

$$T_s = T_m / 1 - \frac{1}{L} / \quad /2-6/$$

gdzie:  $L$  - współczynnik tłumienia absorbującego środowiska.

Dla atmosfery uwarstwionej poziomo można do określenia temperatury szumowej nieba pod kątem zenitalnym  $\phi$  stosować następujący wzór:

$$T_s / \phi / \beta_0 = T_m / 1 - \beta_0 \sec \phi / \quad /2-7/$$

gdzie:  $\beta_0 = \frac{1}{L_0}$  - współczynnik transmisji atmosfery w kierunku zenitalnym.

Rysunek 2-11 przedstawia temperaturę szumową nieba w funkcji częstotliwości, w zakresie od 1 do 100 GHz, przy różnych kątach elewacji.

Bardziej szczegółowe informacje na temat temperatury szumowej nieba w zakresie 1 - 10 GHz można znaleźć w lit. [25]. W jednej z najnowszych publikacji Damosso i de Padova [26] wykazują, że w zakresie 10 - 20 GHz możliwe jest określenie temperatury szumowej nieba w kierunku zenitalnym na podstawie wilgotności gleby.

W Sprawozdaniu 564 /Rev.76/ CCIR [22] podano informacje o pomiarach bezpośrednich prowadzonych z satelitów w USA [27, 28] i w Japonii [16]. W tym samym sprawozdaniu opisano również pomiary radiometryczne prowadzone na dużą skalę w Japonii [19, 29, 30]. Również w Japonii prowadzono pomiary tłumienia oparte na obserwacjach szumu Księżyca na częstotliwościach 15.5 i 31.6 GHz [31]. Pomiary radiometryczne z wykorzystaniem promieniowania Słońca były prowadzone w Anglii na częstotliwościach 12, 19, 37 i 71 GHz, odpowiednio w ciągu 36, 52, 39 i 6 miesięcy [32]. Podano również w Sprawozdaniu 564 /Rev.76/ wzmianki o badaniach radiometrycznych w Kanadzie [33], Australii [34] oraz o pomiarach radiometrycznych temperatury szumowej nieba na obszarze Europy, prowadzonych pod egidą Europejskiej Organizacji Badań Kosmicznych [35]. Wreszcie pomiary radarowe prowadzono w Kanadzie [36] i w Szwajcarii [37].

## 2.8. Zastosowanie odbioru zbiorczego przestrzennego

Niekorzystne efekty wywoływane przez hydrometeory na trasach Ziemia-Kosmos można zmniejszyć przez stosowanie techniki odbioru zbiorczego przestrzennego. Wykorzystuje się tu po prostu okoliczność, że obszar intensywnego deszczu jest normalnie dosyć ograniczony. Trzeba w tym celu znać rozkład prawdopodobieństwa tłumienia wywoływanego przez opady wzdłuż prostej łączącej projektowane lokalizacje stacji ziemnych. Istotne jest też wzajemne położenie tej prostej oraz trasy łączącej i tras frontów burzowych.

W celu zbadania warunków, jakim powinny odpowiadać lokalizacje stacji naziwionych przy zastosowaniu odbioru zbiorczego prowadzono w ostatnich latach szereg kampanii pomiarowych w USA, Anglii, Japonii i Kanadzie. Radiometry rozmieszczano zazwyczaj w odległościach od kilku do ok. 30 km. Badania prowadzone w New Jersey [38] wykazały na przykład, że tłumienie 10 dB występuje w odległości 11 km jednocześnie przez 0.004% czasu, zaś w odległości 19 km - przez 0.003% czasu. Natomiast tłumienie 6 dB objawia się jednocześnie w odległości 11 km w ciągu 0.01% czasu, w odległości 19 km - w ciągu 0.008% i w odległości 30 km - w ciągu 0.004% czasu. Z pomiarów angielskich [39, 40] wynika, że optymalna odległość wynosi 7 km. Badania japońskie [30] wykazały zysk ok. połowy /liczony w decybelach/ przy rozstawieniu radiometrów w rozstępie 15 km, przy częstotliwości pomiarowej 35 GHz. Niektóre szczegóły z przytoczonych i jeszcze innych badań są podane w Sprawozdaniu 564 /Rev.76/ CCIR [22, 41].

## 2.9. Czas przejścia fali na trasie Ziemia - Kosmos

Atmosfera ziemską powoduje opóźnienie przejścia fali na trasie Ziemia-Kosmos. Na częstotliwościach powyżej 10 GHz wpływ jonosfery na czas propagacji jest znikomy i opóźnienie można przypisać wyłącznie troposferze. Decydują o nim wahania wskaźnika refrakcji i opady.

Sredni czas propagacji i jego zmiany można obliczać, dysponując statystycznymi wartościami wskaźnika refrakcji na powierzchni Ziemi  $N_s$ . Odpowiednie zależności i metodę obliczania podają Bean i Dutton w Monografii No 92 NBS [7]. Czas propagacji jest istotny dla łączy satelitarnych wielodostępnych z podziałem czasowym /AMRT/ ze względu na synchronizację i obliczanie odległości satelitów. Dużo informacji na temat czasu propagacji w troposferze pogodnej i poprzez obszary deszczu podaje m.in. dokument kanadyjski nr 5/23 z 1975 r. [42].

## 2.10. Ograniczenia szerokości pasma w systemach łączności kosmicznej

Rozproszenie fali w opadach atmosferycznych i związane z tym tłumienie jest zależne od częstotliwości. Wykazano jednakże, że istotne ograniczenia szerokości pasma występują dopiero, jeżeli pasmo jest szersze od 3,5 GHz. Ponieważ w zakresie częstotliwości poniżej 40 GHz podzakresy przydzielone na potrzeby łączności Ziemia - Kosmos są węższe, ograniczenia powyższe nie przedstawiają problemu. Ostatnio zajęto się zagadnieniem wpływu częstotliwości na funkcjonowanie szerokopasmowych łączy transmisji danych, których trasy przebiegają przez obszar deszczu padającego ukośnie, przy czym krople deszczu mają kształt odbiegający od kulistego [43].



## 2.11. Zagadnienia różne

Nieregularności wskaźnika refrakcji są m.in. przyczyną występowania wielodrogowości sygnałów. W konsekwencji tego zjawiska, oprócz wahania poziomu, powstaje jeszcze składowa ortogonalna polaryzacji, właściwej fali emitowanej. Stosunek poziomów sygnału odbieranego przy obu polaryzacjach, zwany odsprężeniem polaryzacyjnym, nie wykazuje żadnej korelacji między składowymi. Na wahania odsprężenia wpływa również deszcz, zwłaszcza gdy pada ukośnie i krople mają kształt wyraźnie wystużonej elipsy. Badania były prowadzone głównie na trasach Ziemia-Ziemia i mało jest dotąd danych dla tras Ziemia - Kosmos. Zagadnienie wykorzystywania polaryzacji ortogonalnych jest istotne z punktu widzenia rozdziału częstotliwości. Wymaga ono prowadzenia badań, szczególnie ustalenia wartości dyskryminacji polaryzacyjnej w zależności od intensywności opadów, kąta elewacji i częstotliwości.

Zaobserwowano, że podczas opadów deszczu, niezależnie od rozproszenia i tłumienia wywoływanego przez te opady, występuje niekiedy odchylenie wiązki. Przypisuje się to odbiciu fali przez "ścianę" ukośnie padającego deszczu. Zjawisko to może mieć znaczenie dla stacji naziemnych z antenami o silnie skoncentrowanej wiązce fal.

Wiele badań prowadzi się w celu uzyskania materiału statystycznego niezbędnego do określania poziomu zakłóceń między stacjami naziemnymi i satelitarnymi pokładowymi. Interesujące w tym aspekcie są przede wszystkim poziomy tłumienia nieprzekraczane w małych procentach czasu. Informacji na ten temat dostarcza Sprawozdanie 569 CCIR [44].

## 3. WPŁYW JONOSFERY NA FALE RADIOWE W RELACJI ZIEMIA - KOSMOS

### 3.1. Ogólny przegląd problematyki

Jeśli pominąć zakres bardzo małych częstotliwości, w którym fale prowadzone wzdłuż linii pola geomagnetycznego wybiegają dość daleko w przestrzeń kosmiczną, dopiero częstotliwości wyraźnie przewyższające maksymalną częstotliwość użytkową dla łączności krótkofalowej /MUF/ można brać pod uwagę dla potrzeb łączności między Ziemią i przestrzenią kosmiczną. Jednakże fale o stosunkowo nawet dużych częstotliwościach, przenikające przez jonosferę, podlegają w większym lub mniejszym stopniu jej wpływom. Praktycznie oddziaływanie jonosfery zaznacza się aż do ok. 30 GHz.

Istnieje zatem dosyć szeroka problematyka związana z wpływem jonosfery na propagację fal wykorzystywanych w łączności Ziemia - Kosmos, najogólniej ujęta w Zagadnieniu 18-1/6 CCIR [45]. Postawiono tu następujące pytania: 1/ jakie czynniki

przy propagacji fal w jonosferze i poprzez jonosferę mają wpływ na wykorzystanie częstotliwości w radiokomunikacji i radionawigacji z udziałem systemów łączności kosmicznej, 2/ w jaki sposób te czynniki wpływają na rozdział częstotliwości między ziemskie i kosmiczne służby łączności radiowej, 3/ w jaki sposób fale radiowe mogą być wykorzystywane do badania jonosfery w aspekcie zastosowań wyników badań do łączności kosmicznej.

Kierunki badań zostały sprecyzowane w Programie Studiów 18B-1/6. Proponuje się tu opracować metody pomiarów i prognozowania refrakcji jonosferycznej z punktu widzenia wpływu na kąt przychodzenia fali, prędkość fazową i grupową. Następnie postuluje się badania tłumienia w jonosferze, badania zjawisk Dopplera i Faradaya, scyntyłacji i ich skutków oraz rozkładu gęstości elektronowej i pola magnetycznego. Zaproponowano również badania propagacji prowadzonej między satelitami krążącymi po niskich orbitach.

### 3.2..Scyntyłacje

Podobnie jak w troposferze, scyntyłacje mające swe źródło w jonosferze objawiają się w postaci szybkich zmian amplitudy, fazy, polaryzacji i kąta przychodzenia fali. Scyntyłacje są wywoływane przez nieregularności gęstości elektronowej w obszarach jonosferycznych, przez które fala przebiega. Bardzo silne scyntyłacje mogą w znacznym stopniu utrudniać działanie łączności Ziemia - Kosmos.

Najwięcej danych pomiarowych zebrano w zakresie fal metrowych oraz na 400 MHz, 1,5, 4 i 6 GHz. Wyników pomiarów fluktuacji fazy i polaryzacji jest stosunkowo mało. W największym stopniu badano scyntyłacje amplitudy. Stwierdzono, że na ogół maleją one ze wzrostem częstotliwości, przynajmniej w zakresie powyżej 100 MHz. Miarą wielkości scyntyłacji amplitudy jest wskaźnik scyntyłacji  $S_4$  [46]. Wartość wskaźnika mniejsza od 0,6 oznacza raczej słabe scyntyłacje. Wartości  $S_4$  ok. 1 charakteryzują silne scyntyłacje. Na tym poziomie są one zasadniczo niezależne od częstotliwości, podczas gdy zmienność słabych scyntyłacji wyraża się przybliżoną zależnością  $\lambda^{1.5}$ . Dla kątów elewacji większych od  $20^\circ$  można przyjąć, że natężenie scyntyłacji jest związane zależnością wyrażoną przez cosecans kąta elewacji z wartością odpowiadającą kierunkowi zenitalnemu. W zakresie kątów elewacji poniżej  $20^\circ$  zależność ta bardziej zbliża się do pierwiastka kwadratowego z cosecansa kąta elewacji. Wielkość scyntyłacji zależy ponadto od odległości pomiędzy źródłem fali, obszarem nieregularności i obserwatorem, a następnie od czasu, szerokości geomagnetycznej, aktywności słonecznej i wskaźników magnetycznych. Scyntyłacje powstają głównie w obszarze F, aczkolwiek udział obszaru E też jest niewykluczony.

Począwszy od roku 1947 badano scyntyłacje, wykorzystując radiogwiazdy. Badania te miały charakter przede wszystkim jakościowy. Pomimo to wniosły one znaczny

wkład do poznania morfologii obszarów nieregularności jonosfery na wysokich szerokościach geograficznych i w pasmie równikowym.

Zmienność scyntytacji zależy w dużym stopniu od pory doby i sezonu, ale zależności te są różne w obszarach równikowych, umiarkowanych szerokości i podbiegunowych.

W pobliżu równika geomagnetycznego obserwuje się silne scyntytacje w nocy, zmieniające się w zależności od pory roku i fazy cyklu aktywności słonecznej. Szczegóły wyników badań podane są w Sprawozdaniu 263-3/Rev.76/ CCIR. Stwierdzono m.in., że najsilniejsze fluktuacje występują w pierwszych godzinach nocy, a maksimum przypada w okresach równonocy. Zaobserwowano również korelację dodatnią z aktywnością słoneczną.

Na umiarkowanych szerokościach występuje bardzo wyraźne maksimum scyntytacji około północy, ale zauważono i drugie maksimum, objawiające się niekiedy w południe, związane prawdopodobnie z aktywnością jonizacji sporadycznej  $E_s$  [47]. To drugie maksimum występuje głównie w porze letniej.

Scyntytacje wzrastają bardzo znacznie, jeżeli trasa propagacji przechodzi przez obszary nieregularności gęstości elektronowej na dużych szerokościach. W szczególności silne scyntytacje obserwuje się w obszarach objętych pasem zorzy polarnej. Linia przebiegająca w pobliżu pasa zorzowego, po stronie mniejszych szerokości, nazywana jest granicą scyntytacji. Wewnątrz obszaru objętego tą granicą scyntytacje stają się jeszcze bardziej intensywne, nieregularności zaś formują krzywe zamknięte wokół bieguna geomagnetycznego.

Rejestracja sygnałów nadawanych przez satelitę ATS-3, prowadzona w Hamilton /USA/ oraz w Narsarssuak na Grenlandii, na 137 MHz w ciągu ok. 3 lat, wykazała występowanie zaników w procentach czasu podanych w tabeli poniżej [48].

T a b e l a 3-1

Zaniki scyntytacyjne w punktach pomiarowych zlokalizowanych w umiarkowanych i dużych szerokościach geomagnetycznych

Głębokość zaników dB /międzyszczytowa/	Procent czasu występowania	
	szerok. umiarkowane	szerok. duże
3.7 - 5.9	7.4	15.0
6.0 - 9.4	4.7	17.9
9.5 - 12.7	1.6	12.9
pow. 12.7	2.9	29.5

Inne badania przeprowadzane w Kanadzie [49, 50] wykazały, że głębokość zaników zależy zarówno od szerokości geomagnetycznej, jak i od częstotliwości. Głębokość zaników maleje w funkcji częstotliwości. Na przykład w Churchill /Mani-

toba/ dla uzyskania niezawodności 99,9% trzeba było przyjąć zabezpieczenie przeciwanikowe od 8 do 14 dB na 254 MHz i tylko 0,35 do 0,8 dB na 1500 MHz.

### 3.3. Absorpcja jonosferyczna

W obszarach małych i umiarkowanych szerokości geograficznych fale o częstotliwościach powyżej 70 MHz przenikają jonosferę bez znaczniejszej absorpcji. W strefach zorzy i czapki polarnej objawiają się wpływy krótkoterminowych wahań aktywności słonecznej, które pociągają za sobą zwiększoną absorpcję. Występowanie tych zjawisk jest przypadkowe, okres trwania bardzo różny, a efekt zależy od lokalizacji stacji naziemnej, kierunku trasy i kąta elewacji. Znaczną absorpcję jonosferyczną, w czasie trwania rzędu pół godziny, wywołują też rozbłyski słoneczne. Jednakże na falach metrowych te efekty są na ogół słabe i szybko maleją w funkcji częstotliwości.

Na trasach ukośnych absorpcja jonosferyczna wzrasta z secansem kąta padania fali na jonosferę i maleje z kwadratem częstotliwości. Absorpcja na trasie zenitalnej w umiarkowanych szerokościach geograficznych, na 30 MHz, wynosi w warunkach normalnych od 0,2 do 0,5 dB. Podczas rozbłysku absorpcja wzrasta, ale na ogół nie przekracza 5 dB.

Absorpcja zorzowa jest wywołana koncentracją elektronów w obszarach jonosferycznych D i E. Zjawisko występuje w pasie o szerokości  $10^{\circ}$  -  $20^{\circ}$  w rejonie pojawiania się wizualnego efektu zorzy polarnej. Absorpcja zorzowa nie ma charakteru zjawiska stałego, ani ciągłego. Jest to raczej szereg następujących po sobie, trwających od kilku minut do kilku godzin, dyskretnych nasileń absorpcji. W porze nocnej występują szybkie, kilkuminutowe fluktuacje absorpcji, rano stają się one bardziej regularne, a w porze dziennej powoli zjawisko słabnie. Wielkość absorpcji zorzowej zależy od szerokości i długości geograficznej /geomagnetycznej/, godziny, pory roku i aktywności słonecznej. Szerokość pasa zorzowego zmienia się od ok.  $12^{\circ}$  do ok.  $18^{\circ}$  i przesuwają się on o ok.  $3^{\circ}$  w kierunku równika, gdy wskaźnik aktywności słonecznej  $R_{12}$  wzrasta od 0 do 100. O wielkości absorpcji zorzowej i jej możliwym wpływie na działanie łączy satelitarnych daje pojęcie tab. 3-2, wzięta ze Sprawozdania 263-3 CCIR.

Na szerokościach geomagnetycznych większych od  $64^{\circ}$  występuje podobne zjawisko absorpcji, zdarzające się rzadziej od absorpcji zorzowej, związane również z aktywnością Słońca. Jest to tzw. absorpcja w strefie czapki polarnej. Spowodowana jest ona bombardowaniem wysokich warstw atmosfery przez protony pochodzenia słonecznego, ogniskowane w strefach polarnych przez pole geomagnetyczne. Zjawisko występuje głównie w okresach dużej aktywności Słońca, 10-12 razy w roku i trwa zazwyczaj kilka dni, co odróżnia je od absorpcji zorzowej, przeważnie trwającej kilka minut, ale często powtarzającej się.

T a b e l a 3-2

Absorpcja zorzowa na 127 MHz w dB

Procent czasu	Kąt elewacji	
	20°	5°
0,1	1,5	2,9
1	0,9	1,7
2	0,7	1,4
5	0,6	1,1
50	0,2	0,4

Występowanie absorpcji w strefie czapki polarnej ilustruje tabela poniżej i rys. 3-1.

T a b e l a 3-3

Zjawisko absorpcji w strefie czapki polarnej

Rok	1956	1957	1958	1959	1960	1961	1962
$R_{12}$	142	190	188	160	114	55	38
Liczba zjawisk	4	13	9	5	12	3	0
Średni czas trwania godz.	104	60	76	149	54	69	-
Średnia absorpcja dB	7	5	10	18	7	9	-

#### 3.4. Wpływ refrakcji i zmiany kąta przychodzenia fali

Gradient gęstości elektronowej powoduje odchylenie toru fali przechodzącej ukośnie przez jonosferę. W rezultacie powstaje pewien błąd w określeniu pozycji kątownej źródła promieniowania. Na wysokościach od 300 do 1000 km ten wpływ refrakcji jest maksymalny i błąd kątowy dla kąta elewacji  $3^{\circ}$  -  $5^{\circ}$  może być rzędu kilku miliradianów. Gdy wysokość i kąt elewacji wzrastają, błąd kątowy maleje [52]. Również błąd zmniejsza się ze wzrostem częstotliwości odwrotnie proporcjonalnie do jej kwadratu.

Powodujące odchylenia kąta przychodzenia fali zmiany refrakcji są konsekwencją dobowych wahań gęstości elektronowej, ale także następują wskutek przesuwania

nia się obszarów nieregularności jonosferycznych o rozciągłości dziesiątków do setek kilometrów. Te ostatnie zmiany wywołują fluktuacje kąta przychodzenia fali o okresach rzędu 15 minut do godziny i więcej. Fluktuacje te są wielkości miliradiana na 100 MHz i są odwrotnie proporcjonalne do kwadratu częstotliwości.

### 3.5. Czas propagacji grupowej

Jonosfera powoduje zmniejszenie prędkości grupowej fal przechodzących na trasie między stacją naziemną i satelitą lub innym obiektem kosmicznym. Ma to znaczenie szczególnie przy określaniu odległości i w satelitarnych systemach nawigacyjnych.

Opóźnienie, zwane potocznie "czasem propagacji grupowej", określone jest następującą zależnością:

$$\Delta T = \frac{1,33 \cdot 10^{-7}}{f^2} N_s \quad /3-1/$$

gdzie:  $\Delta T$  - czas propagacji grupowej w sekundach,

$f$  - częstotliwość w Hz,

$N_s$  - gęstość elektronowa w  $e/m^2$ .

Na rysunku 3-2 przedstawione są zmiany czasu propagacji grupowej w funkcji częstotliwości przy różnych wartościach gęstości elektronowej.

Pomiary gęstości elektronowej wykonywane są na falach metrowych przy wykorzystaniu zjawiska rotacji Faradaya. Zjawisko to polega na skręcaniu płaszczyzny polaryzacji fali w obecności pola geomagnetycznego. Sygnał pomiarowy w zakresie fal metrowych jest nadawany przez satelitę krążącego na względnie niskiej orbicie, rzędu tysiąca kilometrów lub przez satelitę geostacjonarnego. Zjawisko rotacji Faradaya objawia się najsilniej w obszarach jonosfery poniżej 1000 km. Powyżej 2000 km pewien wpływ na opóźnienie fali wywierają jeszcze swobodne elektrony stanowiące zawartość egzosfery. Gęstość elektronowa egzosfery nie daje się mierzyć za pomocą zjawiska Faradaya. Informacje na temat morfologii egzosfery są na razie jeszcze bardzo skąpe. Wprowadzono pojęcie całkowitej zawartości elektronowej /ang.: Total Electron Content/. Jest to liczba elektronów swobodnych w cylindrze o podstawie  $1 m^2$ , pionowym, rozciągającym się poprzez całą jonosferę i egzosferę:

$$TEC = N_i + N_p \quad e/m^2 \quad /3-2/$$

gdzie:  $N_i$  - gęstość elektronowa w jonosferze /równoważna/,

$N_p$  - gęstość elektronowa w egzosferze.

Aby określić wartość  $N_s$  występującą we wzorze 3-1, trzeba TEC pomnożyć przez secans kąta zenitalnego trasy na wysokości ok. 400 km. Ja'co jednostkę TEC wygodną w praktyce przyjęto  $10^{16}$  e/m<sup>2</sup>. Rysunek 3-3 przedstawia konturową mapę rozkładu TEC w umiarkowanych szerokościach wg de Mendonca i innych [53].

Należy się liczyć ze znacznymi zmianami wartości  $N_s$  podczas zaburzeń jonosferycznych. Burza jonosferyczna może spowodować wzrost  $N_s$  o 100% lub spadek o 50-75%. Są czynione usiłowania stworzenia przybliżonego modelu jonosfery zaburzonej, na razie bez większego powodzenia.

### 3.6. Zagadnienia różne

Szybka zmiana gęstości elektronowej czynnej warstwy jonosferycznej powoduje odpowiednią zmianę wysokości pozornej tej warstwy, a w konsekwencji następuje pewne przesunięcie częstotliwości odbieranej względem nadawanej. Jest to dobrze znane zjawisko Dopplera. Dla fali przenikającej jonosferę na trasie Ziemia-Kosmos znaczenie tego zjawiska jest drugorzędne. Natomiast, odwrotnie, można wykorzystać zjawisko Dopplera do badań gęstości elektronowej jonosfery i egzosfery za pomocą satelitów.

Pomiary tego typu były prowadzone jeszcze w latach sześćdziesiątych przez Alperta [54] i Rawera [55]. Systematyczne badania zjawiska Dopplera na częstotliwościach 20 i 40 MHz były również prowadzone przez Joint Satellite Studies Group [56]. Stwierdzono jednak wówczas, że refrakcja jonosferyczna nie pozwala dostatecznie dokładnie określić momentu największego zbliżenia satelity, co w ok. 40% przypadków obciążało poważnym błędem wyniki pomiarów.

Znaczenie dla łączności Ziemia - Kosmos ma zjawisko Faradaya, polegające na skróceniu płaszczyzny polaryzacji fali przechodzącej przez jonosferę wskutek rozszczepienia fali pod wpływem pola geomagnetycznego. Rotacja Faradaya jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu częstotliwości. Istotne znaczenie ma zjawisko Faradaya w zakresie fal metrowych. Jest ono też zależne od pory roku, aktywności słonecznej i szerokości geomagnetycznej.

Emisje szerokopasmowe mogą doznawać ujemnych skutków zależności czasu propagacji od częstotliwości. Wpływ ten jest ponadto zależny od gęstości elektronowej scałkowanej wzdłuż trasy. Zróżnicowanie czasu propagacji może być np. dla pasma 6 MHz przy częstotliwości nośnej 100 MHz ok. 0,6 us, podczas gdy przy 500 MHz już tylko ok. 0,005 μs. Jak widać, efekt jest istotny głównie w zakresie fal metrowych.

## 4. WARUNKI ODBIORU RADIOWEGO NA KSIĘŻYCU

Jako podstawowy model propagacyjny można przyjąć dla Księżyca dyfrakcyjny sposób rozchodzenia się fal w terenie nierównym i niejednorodnym bez wpływu at-

mosfery. Możliwe jest zatem stosowanie krzywych, wzorów i metod obliczeniowych podobnych jak dla warunków ziemskich, z tym że pomija się wszelkie oddziaływanie troposfery i jonosfery.

Zasadnicza trudność w łączności Ziemia - Księżyc występuje wtedy, gdy punkt odbiorczy na Księżycu znajdzie się na odwróconej od Ziemi jego stronie. Pole dyfrakcyjne ulega szybkiemu tłumieniu w funkcji odległości, tym bardziej że promień krzywizny Księżyca jest znacznie mniejszy od promienia Ziemi. Istnieje natomiast pewna okoliczność pozytywna wynikająca z tej sytuacji. Mianowicie odwrócona od Ziemi strona Księżyca stanowi strefę spokojną, jeśli chodzi o zakłócenia radioelektryczne pochodzenia ziemskiego. Dzięki temu może to być nadzwyczaj dogodny teren do zlokalizowania urządzeń przeznaczonych do badań radioastronomicznych.

Ponieważ okres obrotu Księżyca dokoła własnej osi jest równy okresowi obrotu dokoła Ziemi, jest on stale zwrócony tą samą stroną do Ziemi. Jednakże dzięki libracji, polegającej na swego rodzaju kołysaniu się Księżyca, ok. 59% jego powierzchni można widzieć z Ziemi. Pozostała część jest zawsze ekranowana od Ziemi i nosi nazwę "czapki zaekranowanej" [57]. Sztuczne satelity krążą na orbitach mniej lub więcej od Ziemi oddalonych, a przez to mogą znaleźć się bliżej Księżyca i wprowadzić zakłócenia do części czapki zaekranowanej. Jeżeli przyjąć, że orbity tych satelitów zamykają się wewnątrz kuli o promieniu 100000 km, to można obliczyć, że czapka zaekranowana redukuje się do ok. 30% powierzchni Księżyca.

Grunt księżycowy ma przenikalność dielektryczną ok. 2,6 i bardzo złą przewodność. Dzięki dyfrakcji fale radiowe mogą wprawdzie wchodzić nieco na obszar czapki zaekranowanej, ale ulegają szybkiemu tłumieniu w funkcji odległości. Można uważać, że zakłócenia przychodzące z Ziemi lub z satelitów okołoziemskich wnikają jeszcze co najwyżej na 100 km w głąb strefy spokojnej.

## 5. ZAGADNIENIA PROPAGACYJNE ISTOTNE Z PUNKTU WIDZENIA RADIODYFUZJI SATELITARNEJ

### 5.1. Zakres problematyki

Wszystkie zagadnienia omówione w poprzednich rozdziałach, związane z wpływem troposfery i jonosfery na warunki łączności obiektów kosmicznych ze stacjami naziemnymi, są istotne tak samo i dla radiodyfuzji satelitarnej. Służba ta, której rozwój zostanie zapewne zapoczątkowany w niedalekiej już przyszłości, będzie miała swoje specyficzne problemy, wymagające ponadto nieco innego ujęcia niekiedy, niż łączność kosmiczna na trasach od naziemnej stacji satelitarnej do satelity i odwrotnie. Charakter służby jest podobny, jeśli chodzi o przesyłanie programu z Ziemi do satelity radiodyfuzyjnego, ale zasadniczo różny na trasie



satelita - abonent. Konieczność pokrycia programem stosunkowo dużych obszarów wymaga statystycznego potraktowania wpływów środowisk propagacyjnych, przez które fala przechodzi. Występują na przykład znaczne różnice kątów przychodzenia fali w środku i na krańcach terytorium obsługiwanego, a w związku z tym duże rozpiętości wartości tłumienia. Lokalizacja naziemnej stacji satelitarnej dla służby stałej jest wybierana nadzwyczaj starannie i wpływ otoczenia na propagację fal emitowanych i odbieranych jest zdeterminowany. Natomiast sytuacja abonenta jest pod tym względem nieokreślona i wpływ ukształtowania i pokrycia otaczającego terenu może być ujęty tylko na drodze analizy statystycznej opartej na dostatecznie obszernym materiale pomiarowym.

Kierunki badań, jakie powinny być prowadzone pod kątem widzenia potrzeb radiodyfuzji satelitarnej, są podane w Programie Studiów 7/B5 /Rev.76/[58]. Szereg zagadnień jest wspólnych dla radiodyfuzji ziemskiej i satelitarnej. Ponieważ dla tej ostatniej przewiduje się przede wszystkim wykorzystanie częstotliwości w zakresach powyżej 10 GHz, omawiany program studiów CCIR ogranicza się do tych zakresów. Postulowane są następujące kierunki badań:

- wielokrotne pomiary z zapisem natężenia pola sygnałów nadawanych przez satelity, w różnych rejonach świata,
- badania przestrzennego i czasowego rozrzutu natężenia pola,
- wpływ zabudowy miejskiej na tłumienie sygnałów przychodzących z satelitów,
- statystyka tłumienia molekularnego i opadowego,
- skuteczność anten kierunkowych,
- opracowanie metod i programów maszynowych obliczeń niezawodności odbioru i poziomu zakłóceń.

## 5.2. Propagacyjne właściwości zakresów częstotliwości przewidzianych dla radiodyfuzji satelitarnej

Na mocy decyzji Administracyjnej Konferencji ds. Łączności Satelitarnej w 1971 roku przeznaczono dla radiodyfuzji satelitarnej następujące zakresy:

606 - 790 MHz	dla kierunku od satelity do abonenta
2,5 - 2,69 GHz	dla kierunku od satelity do abonenta
10,95 - 11,2 GHz	doprowadzanie programu do satelity
11,7 - 12,5 GHz	dla kierunku od satelity do abonenta
12,5 - 12,75 GHz	doprowadzenie programu do satelity
14,0 - 14,5 GHz	doprowadzenie programu do satelity
41,0 - 43,0 GHz	dla kierunku od satelity do abonenta
84,0 - 86,0 GHz	dla kierunku od satelity do abonenta

Zakresy częstotliwości przeznaczone dla doprowadzania programu do satelity

znajdują się w części widma optymalnej dla łączności Ziemia - Kosmos. Skupione blisko siebie podlegają wpływom środowisk propagacji zasadniczo w takim samym stopniu.

Inaczej przedstawia się sprawa, jeżeli chodzi o zakresy przeznaczone dla kierunku od satelity do abonenta. Tu właśnie warunki są specyficzne dla służby radiodyfuzji satelitarnej. Najkorzystniejszy z punktu widzenia propagacji byłby zakres 606 - 790 MHz, pokrywający się z przeznaczonym od dawna dla telewizji V zakresem częstotliwości. Również korzystny mogłoby być zakres 2,5 - 2,69 GHz. Istnieją jednak przeciwskazania natury technicznej, jak na przykład bardzo duże wymiary anten, szczególnie poniżej 1 GHz, które limitują perspektywy wykorzystania wymienionych zakresów. Bardzo istotny jest również wzgląd na dotychczasową zajętość częstotliwości w zakresie fal decymetrowych.

W miarę wzrostu częstotliwości pojawiają się w coraz silniejszym stopniu ujemne wpływy troposferyczne; jak tłumienie molekularne gazów atmosferycznych oraz rozproszenie i tłumienie opadowe. Fale milimetrowe, obejmujące zakresy 41-43 i 84-86 GHz nie przedstawiają się pod tym względem zbyt korzystnie. Ponadto trudności techniczne w obecnym etapie rozwoju predestynują te zakresy raczej do wykorzystania w dalszej przyszłości.

Zakresem rozwojowym na najbliższą przyszłość będzie niewątpliwie zakres 11,7-12,5 GHz, pomimo że wymaga on pokonywania trudności natury propagacyjnej. Zródłem ich jest głównie troposfera, gdyż oddziaływanie jonosfery, jak wynika z przeglądu zagadnień w rozdz. 3 jest na tych częstotliwościach już dosyć słabe.

### 5.3. Tłumienie troposfery w zakresie 12 GHz

W Sprawozdaniu 565 CCIR [59] zebrane są wyniki dotychczasowych badań tłumienia troposfery, prowadzonych w zakresie 12 GHz pod kątem widzenia potrzeb planowania systemów radiodyfuzji satelitarnej.

Od 1972 roku Europejska Agencja Kosmiczna prowadzi pomiary radiometryczne w zakresie kątów elewacji  $20 - 45^{\circ}$ , w 9 punktach na terenie Europy [35]. Uważa się, że zmienność sytuacji meteorologicznej z roku na rok wymaga prowadzenia pomiarów co najmniej przez 10 lat. W chwili obecnej dysponuje się wynikami pomiarów zebranych w ciągu 3 lat; dają one jednak już pewien obraz czasowego rozkładu tłumienia. W tabeli 5-1 przedstawiono wartości tłumienia nie przekraczane w ciągu 99% i 99,9% najgorszego miesiąca w roku. Wartości tłumienia podano w rozbiu na poziomy nie przekraczane w 90%, 50% i 10% zbadanych rozkładów rocznych. Prowizorycznie przyjęto, że odpowiadają one najgorszemu, średniemu i najlepszemu rokowi.

Przez kilka lat były prowadzone również pomiary tłumienia na częstotliwości 11,8 GHz w strefie azjatyckiej, w Japonii oraz w Malezji [20]. W strefie tropikalnej tłumienia są znacznie większe.

Tłumienie na  $f = 11,5$  GHz w najgorszym miesiącu roku  
na terenie Europy w zakresie kątów elewacji 20 - 45°

Procent rozkładów	Tłumienie nie przekraczane w dB w ciągu najgorszego miesiąca roku	
	99% czasu	99,9% czasu
90%	1,4	6,0
50%	1,1	3,0
10%	0,9	1,5

#### WYKAZ LITERATURY

1. Dołuchanow M.P.: Propagacja fal radiowych. Tłum. pol. Pankow A., Warszawa WKiŁ 1975.
2. Wielka Encyklopedia Powszechna: hasło "Kosmiczna przestrzeń". Opr. Zonn W., tom 6, Warszawa, PWN 1965.
3. CCIR. Doc. 5C-2/5. Propagation data required for space telecommunication systems. XIIIth Plenary assembly, Geneva 1974, Vol. V, Propagation in non-ionized media /Study Group 5/, s. 296. Geneva: UIT 1975.
4. CCIR. Doc. 5D-2/5. Propagation factors affecting the sharing of the radio-frequency spectrum between terrestrial systems and the earth stations of space telecommunication services. XIIIth Plenary assembly, Geneva 1974, Vol. 5, Propagation in non-ionized media /Study Group 5/, s. 297. Geneva: UIT 1975.
5. CCIR. Doc. 5E-2/5. Scattering from precipitation as a factor in interference for terrestrial and earth-space systems. XIIIth Plenary assembly, Geneva 1974, Vol. V, Propagation in non-ionized media /Study Group 5/, s. 298-299. Geneva: UIT 1975.
6. CCIR. Rap. 234-3 /Rev.76/. Influence de l'atmosphère non ionisée sur la propagation des ondes - Propagation terre-espace. Conclusions de la Réunion interimaire de la Commission d'études 5 /Propagation dans les milieux non ionisés/ Geneve, 16 fevrier - 4 mars 1976, s. 86.
7. Bean B.R., Dutton E.J.: Radio Meteorology. NBS Monograph No 92, U.S. Government Printing Office, Washington. D.C. 1966.
8. CCIR. Rep. 563. Radiometeorological Data. XIIIth Plenary assembly, Geneva 1974, Vol. V, Propagation in non-ionized media /Study Group 5/, s. 96-112. Geneva: UIT 1975.

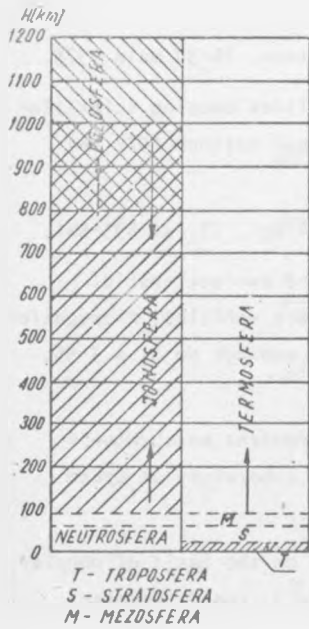
9. Crane R.K.: Propagation phenomena affecting satellite communication systems operating in the centimetre and millimetre wave-length bands. Proc. IEEE 1971, no 59.
10. Yokoi H. i in.: Atmospheric attenuation and scintillation of microwaves from outer space. Astronomical Society, Japan, 1970 Vol. 22, nr 4.
11. CCIR. Rep. 564. Propagation data required for space telecommunication systems. XIIIth Plenary assembly, Geneva 1974, Vol. V, Propagation in non-ionized media /Study Group 5/, s. 249-256. Geneva: UIT, 1975.
12. McCormick K.S., Maynard L.A.: Measurements of SHF tropospheric fading along earth-space paths at low elevation angles. Electron. Letters 1972, nr 8.
13. CCIR. Doc. 5/25. Evanouissement le long de trajets Terre-Espace aux faibles angles de site. 1974-1978.
14. Dutton E.J., Dougherty H.T.: Modelling the effects of clouds and rain upon satellite-to-ground system performance. Office of Telecommunications Report 73-5, Boulder, Colorado /USA/, 1973.
15. Liebe H.J.: Molecular transfer characteristics of air between 40 and 140 GHz. IEEE Trans. 1975 Vol. MTT-23, nr 4.
16. Yokoi H. i in.: Measurement of precipitation attenuation for satellite communication in low elevation angles. Nice, IUCRM, 1973.
17. Fang D.J.: Attenuation and phase shift of microwaves due to canted rain-drops. COMSAT Tech. Rev. 1975 Vol. 5 nr 1.
18. CCIR. Rap. 233-3 /Rev.76/. Influence des regions non ionisées de l'atmosphère sur la propagation des ondes. Propagation sol-sol. Conclusions de la Réunion interimaire de la Commission d'études 5 /Propagation dans les milieux non ionises/, Geneve, 16.2.-4.3.1976.
19. Kinase A., Kimpara E.: Statistics of attenuation due to precipitation of radio waves in 10 GHz band at higher angles of elevation. NHK Laboratories Note, Ser. nr 130. VIII.1969.
20. Kinase A., Kimpara E.: Statistics of attenuation due to precipitation of radio waves in 12 GHz band at higher angles of elevation. NHK Laboratories Note, Ser. nr 171, X.1973.
21. Yokoi H. i in.: Study on the effective path length through rain on an earth-space path. KDD Tech. Note, nr 124, I.1976.
22. CCIR. Rap. 564 /Rev.76/. Donnees sur la propagaqion necessaires aux systemes de telecommunication spatiale. Conclusions de la Réunion interimaire

de la Commission d'études 5 /Propagation dans les milieux non ionisés/. Genève, 16 février - 4 mars 1976.

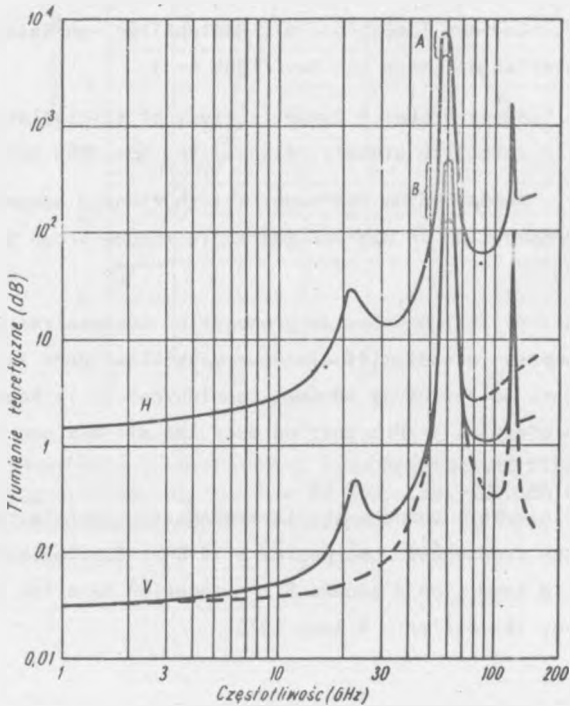
23. Henry P.S.: Measurement and frequency extrapolation of microwave attenuation statistics on the earth - space path at 13, 19 and 30 GHz. IEEE Trans. 1975 Vol. AP-23, nr 2.
24. Fang D.F., Jih J.: A new model for slant path microwave propagation analysis. /w druku/.
25. Snider J.B.: A proposed program for the study of atmospheric attenuation of satellite signals. ESSA Technical Report RL 62-WPL1, January 1968.
26. Damosso E.D., de Padova S.: Some Considerations about sky noise temperature at frequencies above 10 GHz. Alta Freq. 1976 Vol. 45 nr 2.
27. Ippolito L.J.: Effects of precipitation on 15.3 and 31.65 GHz earth-space transmissions with the ATS-V satellite. Proc. IEEE, 1971 Vol. 59 nr 2.
28. Craft H.D.: Attenuation statistics at 15.3 GHz for Clarksburg, Maryland. COMSAT Tech. Rev. 1971 Vol. 1 nr 1.
29. Makino H. i in.: Measurements of 11 and 18 GHz radio wave attenuation due to rainfall at higher angles of elevation. International Symposium on Antennas and Propagation, Japan 1971.
30. Funakawa K., Otsu Y.: Characteristics of slant path rain attenuation at 35 GHz obtained by solar radiation and atmospheric emission observations. J. des Recherches Atmospheriques 1974 Vol. 8.
31. Yokoi H. i in.: Propagation test using astronomical radio sources at 15.5 and 31.6 GHz. Int. Symposium on Antennae and Propagation, Japan, 1971.
32. Davies P.G.: Attenuation by cloud and rain on earth-sun paths at 12-71 GHz. Electron. Letters 1975 Vol. 11 nr 22.
33. CCIR. Doc. 5/28. Affaiblissement du aux précipitations dans un climat maritime du Pacifique. 1974 - 1978.
34. Jenkinson G.F.: Tropical rain attenuation at 11 GHz. A study of 18 month measurements at Innisfail, Queensland. Australian Telecomm. Res. 1975 Vol. 9 nr 1.
35. CCIR. Doc. 5/60. Agence Spatiale Européenne: Proposition de modification du Rapport 565. Données sur la propagation pour la radiodiffusion par satellite aux fréquences supérieures à 10 GHz. 1974 - 1978.
36. Inkster D.R., Rogers R.R.: More radar-derived statistics on slant-path attenuation at 10 GHz. J. des Recherches Atmos. 1974 Vol. 8 s. 421-428.

37. Debrunner W.E., Liniger M.: Influence de la structure des zones pluvieuses sur la propagation des micro-ondes /w j. niem./. Tech. Bulletin de PTT 1975 Vol. 53 nr 8.
38. Wilson R.W., Mammel W.L.: Results from a three-radiometer path-diversity experiment. Proc. Conference on propagation of radio waves at frequencies above 10 GHz. IEE Conference Publication nr 98, 1973.
39. Hall J.E., Allnut J.E.: Results of site-diversity applicable to satellite communications. IEE Conference Publication nr 126 /Satellite Communication Systems Technology / 1975.
40. Davies P.G., Croom D.L.: Diversity measurements of attenuation at a frequency of 37 GHz with solar-tracking radiometers. Electron. Letters 1974 Vol. 10 nr 23.
41. Skerjanec R.E., Samson C.A.: Rain attenuation study for 15 GHz relay design. Federal Aviation Administration Report FAA-RD-70-21, Washington, DC, 1970.
42. CCIR. Doc. 5/23. Caractéristiques statistiques au temps de propagation sur les trajets Terre-Espace. 1974 - 1978.
43. Dougherty H.T. i in.: On digital system performance with bandwidth limited channels. IEEE Trans. Com. Soc. /w druku/.
44. CCIR. Report 569. The evaluation of propagation factors in interference problems at frequencies greater than about 0.6 GHz. CCIR XIIIth Plenary assembly, Geneva 1974, Vol. V, Propagation in non-ionized media /Study Group 5/, s. 258-287. Geneva: UIT 1975.
45. CCIR. Question 18-1/6. Ionospheric factors influencing communication and navigation systems involving spacecraft. CCIR XIIIth Plenary assembly, Geneva 1974, Vol. VI, Ionospheric Propagation /Study Group 6/. Geneva: UIT 1975.
46. Briggs B.H., Parkin I.A.: On the variation of radio star and satellite scintillations with zenith angle. J. Atmos. Terrest. Phys. 1963 Vol. 25 nr 6.
47. Aarons J., Whitney H.E.: Ionospheric scintillations at 136 MHz from a synchronous satellite. Planet. Sp. Sc. 1968 Vol. 16 nr 1.
48. Whitney H.E. i in.: Estimation of the cumulative amplitude probability distribution function of ionospheric scintillations. Radio Science 1972 Vol. 7 nr 12.
49. Maynard L.A.: Channel fading on air mobile satellite communications links. Presented at the AGARD Specialists Meeting of the Electromagnetic Wave Pro-

- pagation Panel on Radio Systems and the Ionosphere, Ateny, 26-30 maja 1975.
50. Hajkovicz L.A.: Distribution of ionospheric irregularities causing scintillations in satellite beacon transmissions. *Nature Physical Science* 1972 Vol. 238, s. 132-134.
  51. Bailey D.K.: Polar cap absorption. *Planet Sp. Sc.* 1964 Vol. 12, s. 495-541.
  52. Millman G.H.: A Survey of tropospheric, ionospheric and extraterrestrial effects on radio propagation between the earth and space vehicles; *Propagation Factors in Space Communications*, AGARD Conference Proceedings No 3, s.3-55, Technivision 1967.
  53. De Mendonca i in.: Low latitude ionospheric electron content measurements during half a solar cycle. *Scientific Report LAFE-84*, Laboratory of Space Physics, Sao Paulo, Brazylia, 1969.
  54. Alpert J.L.: An investigation of the upper atmosphere on the basis of doppler effect in satellite signals at coherent frequencies /w j. ros./. *Geomagn. i Aeronom.* 1963 nr 3.
  55. Rawer K.: Erforschung der Ionosphäre mit Radiowellen von Satelliten und Raketen; *Phasenverfahren*. *Space Sc. Rev.* 1964 nr 3.
  56. Joint Satellite Studies Group: A Synoptic study of scintillations of ionospheric origin in satellite signals. *Planet. Sp. Sc.* 1965 Vol. 3 s. 51-62.
  57. CCIR. Rep. 336-1. Reception on the moon. XIIIth Plenary assembly, Geneva 1974, Vol. V, *Propagation in non-ionized media /Study Group 5/*, s. 52-54. Geneva: UIT 1975.
  58. CCIR. Doc. 7B/5 /Rév.76/. Données de propagation nécessaires pour la radiodiffusion /y compris la radiodiffusion par satellite/ dans les bandes de fréquences situées au-dessus de 10 GHz. *Conclusions de la Reunion Interimaire de la Commision d'études 5 /Propagation dans les milieux non ionisés/*, Geneve, 16 février - 4 mars 1976.
  59. CCIR. Rap. 565 /Rév.76/. Données sur la propagation pour la radiodiffusion par satellite aux fréquences superieures a 10 GHz. *Conclusions de la Reunion Interimaire de la Commision d'études 5 /Propagation dans les milieux non ionisés/*. Geneve, 16 février - 4 mars 1976.



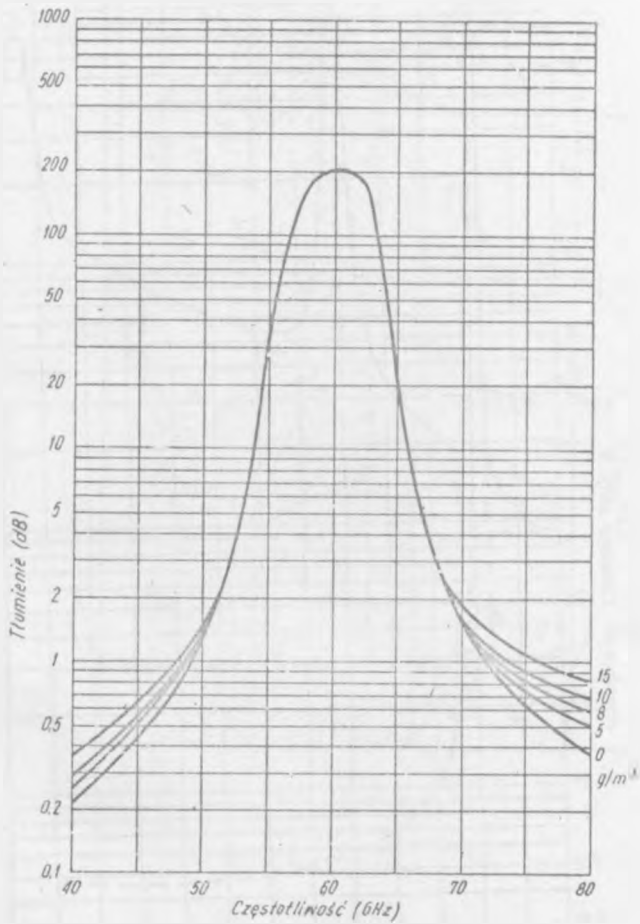
Rys. 2-1. Podział atmosfery ziemskiej na warstwy



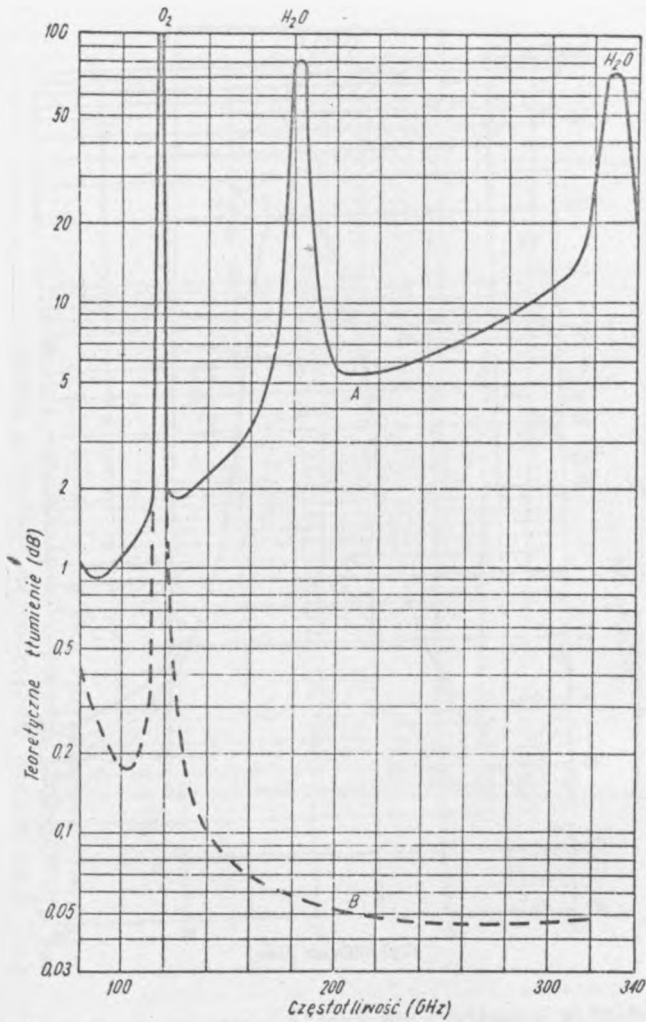
Rys. 2-2. Teoretyczne tłumienie atmosfery średnio wilgotnej /7,5 g/m<sup>3</sup> przy gruncie /na trasie poziomej /H/ i pionowej /V/ w zakresie 1 - 160 GHz /wg Crane'a, 1971/

A i B - zakresy wartości maksymalnych

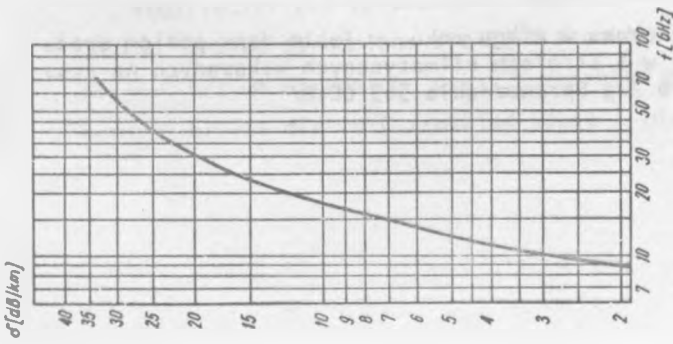




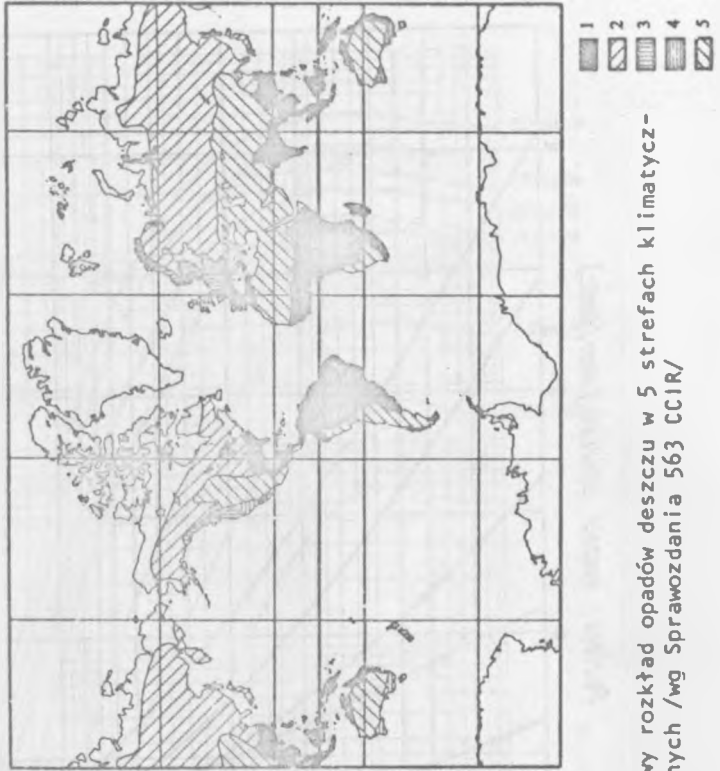
Rys. 2-3. Tłumienie atmosfery na trasie pionowej spowodowane absorpcją molekularną tlenu  $O_2$  na  $f = 60$  GHz dla różnych wilgotności na poziomie morza /wg Sprawozdania 234-3, Rev.76 CCIR/



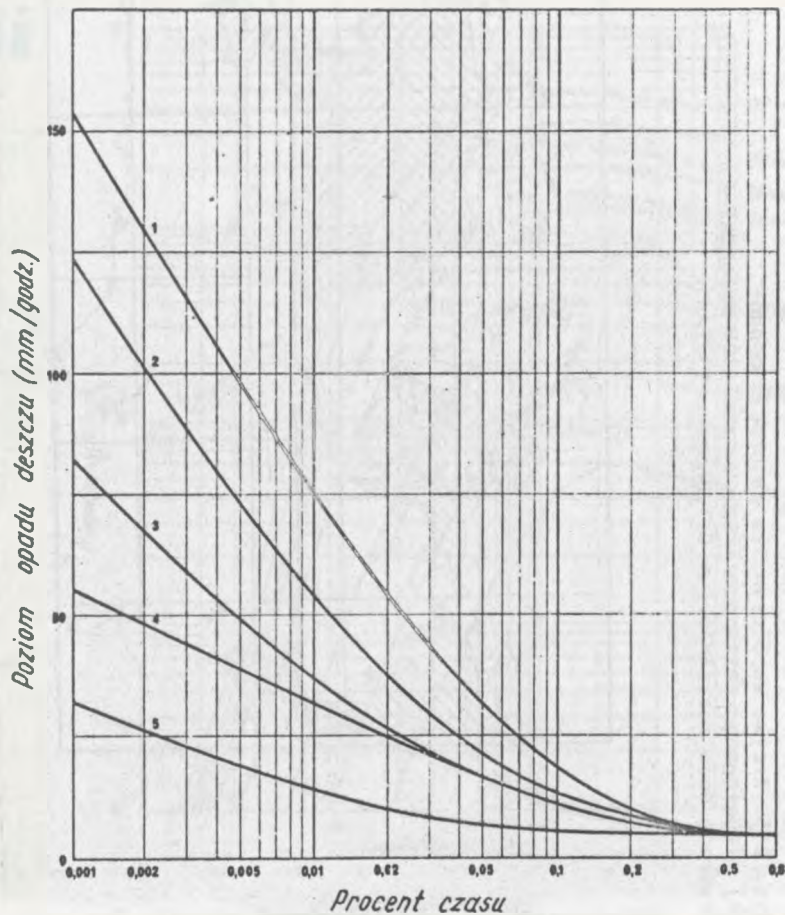
Rys. 2-4. Tłumienie na trasie pionowej w atmosferze pogodnej w zakresie 100 - 340 GHz /wg Sprawozdania 234-3, Rev. 76 CCIR/  
 A - atmosfera średnio wilgotna /7,5 g/m<sup>3</sup> pary wodnej przy gruncie/;  
 B - atmosfera sucha



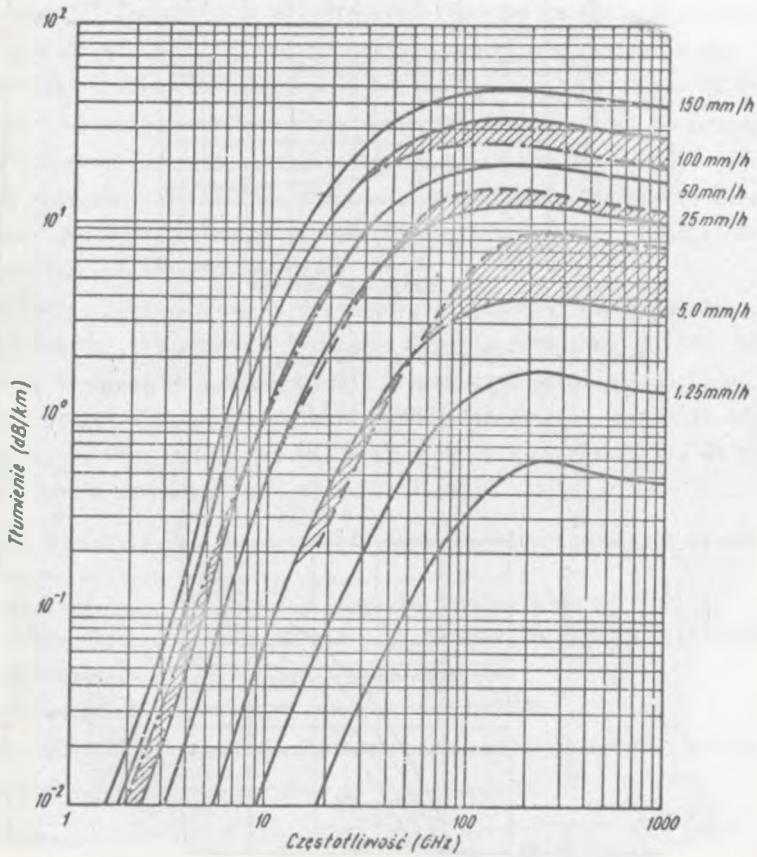
Rys. 2-5. Krzywa współczynnika absorpcji opadów dla ulewnego deszczu o intensywności 100 mm/godz. uzyskana doświadczalnie /wg Dołuchanowa 1972/



Rys. 2-6. Światowy rozkład opadów deszczu w 5 strefach klimatycznych /wg Sprawozdania 563 CCIR/

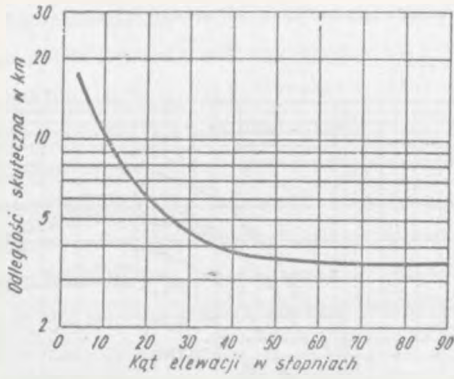


Rys. 2-7. Procent czasu w ciągu roku, w jakim dany poziom opadu jest przekraczany w 5 strefach klimatycznych wskazanych na rys. 2-6 /wg Sprawozdania 563 CCIR/

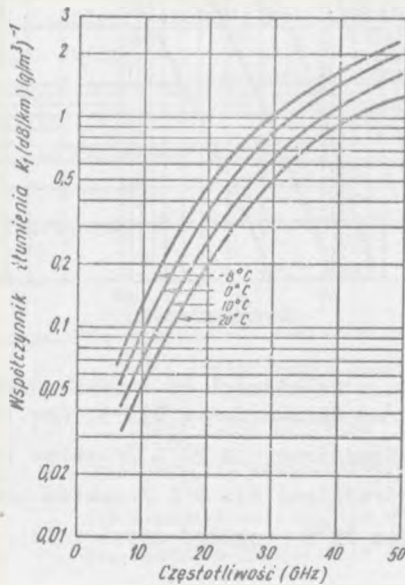


Rys. 2-8. Tłumienie w zależności od intensywności opadu i częstotliwości /wg Sprawozdania 233-3, Rev.76 CCIR/

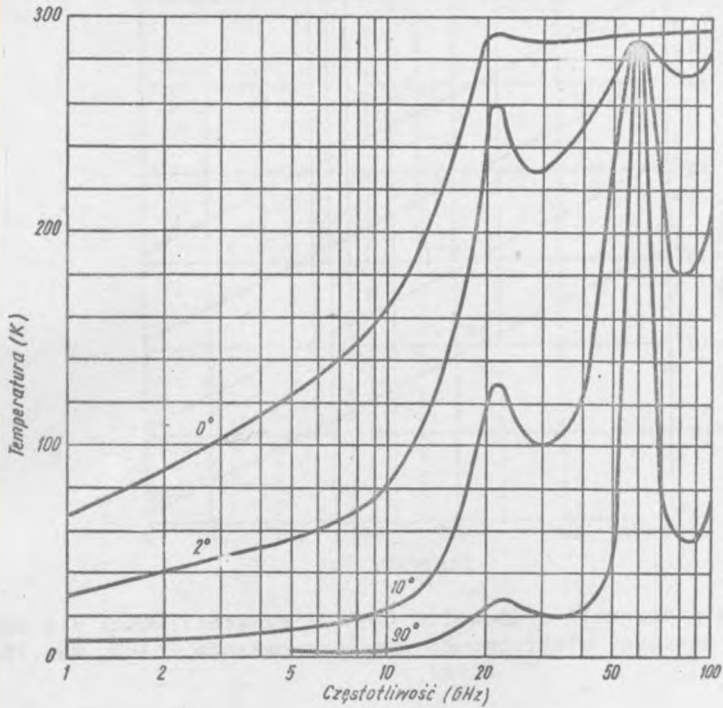
- krzywe uśrednione dla  $20^{\circ}\text{C}$  /rozkład Lawsa i Parsonsa/
- · — · — krzywe uśrednione dla  $0^{\circ}\text{C}$  /rozkład Lawsa i Parsonsa/
- - - - - krzywe dla  $20^{\circ}\text{C}$  /rozkład Jossa i in./



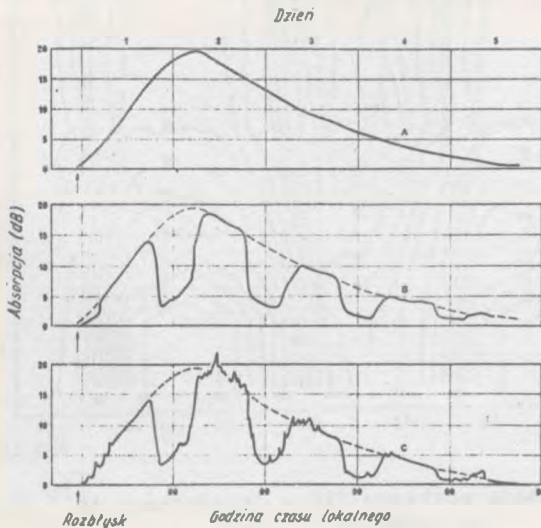
Rys. 2-9. Odległość skuteczna w funkcji kąta elewacji dla 0,01% czasu /wg Kinase I Kimpara 1973/



Rys. 2-10. Współczynnik tłumienia mgły /chmur/ w funkcji częstotliwości przy różnych temperaturach /wg Snidera, 1968/

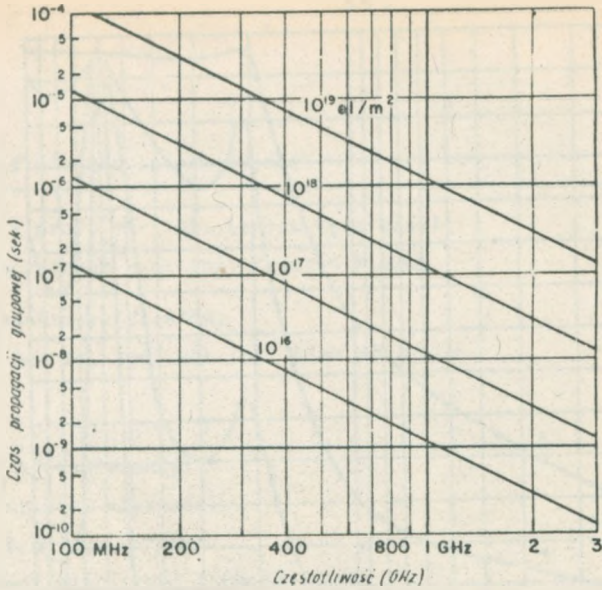


Rys. 2-11. Temperatura szumowa nieba w funkcji częstotliwości przy różnych kątach elewacji /wg Sprawozdania 234-3, Rev. 76 CCIR/

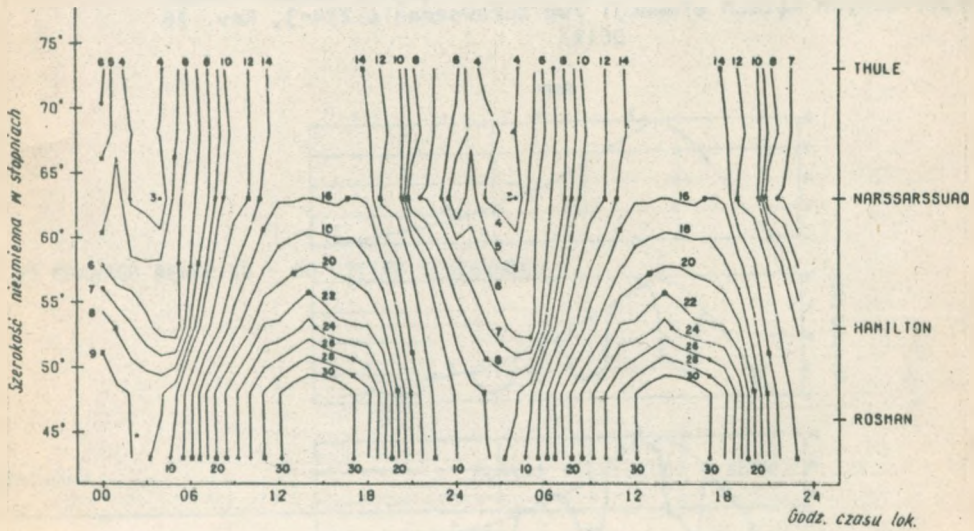


Rys. 3-1. Teoretyczny model absorpcji w obszarze czapki polarnej w następujących dniach po rozbłyasku słonecznym /wg Sprawozdania 263-3, Rev. 76 CCIR/

A - wysokie szerokości /dzień polarny/; B - wysokie szerokości /równonoc/; C - zorza polarna



Rys. 3-2. Czas propagacji grupowej w funkcji częstotliwości dla różnych wartości gęstości elektronowej /wg Sprawozdania 263-3, Rev.76 CCIR/



Rys. 3-3. Konturowa mapa rozkładu TEC w jednostkach  $10^{16}$   $\text{el}/\text{m}^2$  /wg Mendonca i in./



