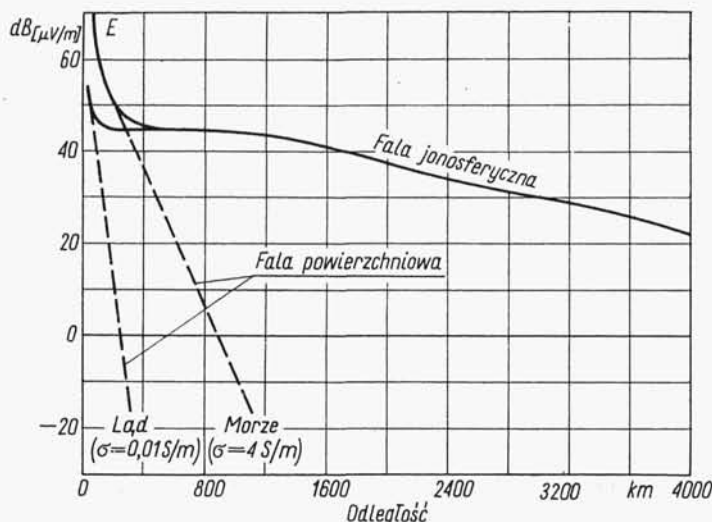


na lądzie następuje już w odległościach rzędu kilkudziesięciu kilometrów. Natomiast na morzu fala powierzchniowa dominuje jeszcze w odległości rzędu 1000 kilometrów.

Na rysunku 16-18 przedstawiono krzywe propagacji fal pośrednich w porze nocnej. Absorpcja w porze nocnej jest mała i nie zależy od szerokości geograficznej. Obszar działania fali jonosferycznej zaczyna się bliżej niż w porze dziennej.



Rys. 16-18. Krzywe propagacji fal pośrednich w porze nocnej ( $f = 3$  MHz, godz. 0<sup>00</sup> czasu miejscowego, grudzień, liczba Wolfa  $W = 5$ ) (według IFRB)

## 16.4. ROZCHODZENIE SIĘ FAL KRÓTKICH

Fale krótkie obejmują zakres częstotliwości od 3 do 30 MHz ( $\lambda = 100 \dots 10$  m).

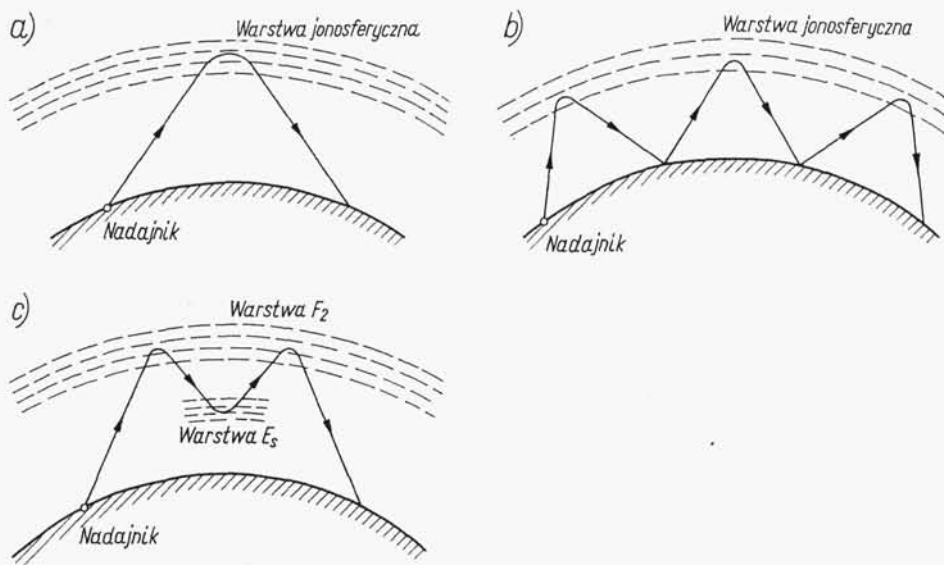
Zasięg fali powierzchniowej w zakresie fal krótkich jest znikomo mały ze względu na znaczne tłumienie wnoszone przez powierzchniowe warstwy gruntu oraz ze względu na krzywiznę ziemi. W odległości kilkudziesięciu kilometrów od nadajnika (dla fal 100 m) do kilku kilometrów (dla fal 10 m) odbiór jest już, praktycznie biorąc niemożliwy. Jednakże na fali jonosferycznej odbiór na falach krótkich jest możliwy na bardzo dużych odległościach. Z tego względu fale krótkie są głównie wykorzystywane dla celów dalekosiężnej radiokomunikacji o zasięgu ogólnosiwiatowym.

Sposób rozchodzenia się fali jonosferycznej w zakresie fal krótkich objaśnia rys. 16-19a. Rysunek ten dotyczy jednorazowego odbicia od jonosfery, czyli tzw. *transmisji jednokokowej*.

Fale krótkie mogą się jednak odbić wielokrotnie od jonosfery i od ziemi w sposób uwidoczniiony na rys. 16-18b. Ten sposób propagacji nazywamy *transmisją wielokokową*. Dzięki transmisji wielokokowej fale krótkie mają zasięg światowy (odległości rzędu kilkunastu tysięcy kilometrów).

Fale krótkie są odbijane głównie przez warstwę  $F_2$ , a w pewnych okresach czasu — przez warstwy  $E$ ,  $E_s$  i  $F_1$ .

Zasadnicze właściwości propagacji fal krótkich wynikają z faktu, że wszystkie częstotliwości krytyczne i maksymalne dla jonosfery leżą w zakresie fal krótkich. W związku z tym nie można na przykład stosować dowolnej częstotliwości dla zapewnienia łączności między dwoma punktami w określonym przedziale czasowym.



Rys. 16-19. Sposoby rozchodzenia się fali jonosferycznej w zakresie fal krótkich: a) transmisja jednokokowa; b) transmisja wielokokowa; c) transmisja typu M

Największą częstotliwość, przy której można jeszcze nawiązać łączność między dwoma punktami, nazywamy *maksymalną częstotliwością użytkową* i oznaczamy przez  $MUF^{1)}$ .

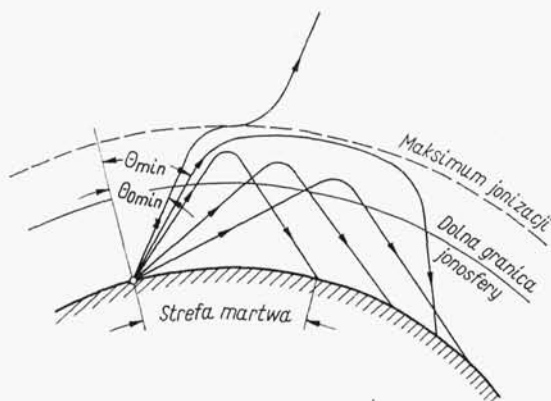
Fale krótkie podlegają w jonosferze tłumieniu. Tłumienie to zachodzi głównie w dolnych warstwach jonosfery, a więc w warstwach  $D$  i  $E$ . Z fal odbijanych przez warstwę  $F_2$  najmniejszemu tłumieniu przy przenikaniu przez warstwę  $E$  podlegają fale o częstotliwości bliskiej  $MUF$ . Ze wzrostem długości fali tłumienie zwiększa się. Zakres częstotliwości użytkowych jest więc ograniczony od góry przez  $MUF$ , a od dołu przez duże tłumienie wnoszone przez niższe obszary jonosfery. Przy zmniejszaniu częstotliwości tłumienie wprowadzane przez jonosferę uniemożliwia nawiązanie łączności. Najmniejsza częstotliwość, która z uwagi na tłumienie może być jeszcze użyta do zapewnienia transmisji na daną odległość, nosi nazwę *najmniejszej częstotliwości użytkowej* i jest oznaczana skrótem  $LUF^{2)}$ .

<sup>1)</sup> Skrót nazwy angielskiej — Maximal Usable Frequency.

<sup>2)</sup> Skrót nazwy angielskiej — Lowest Usable Frequency.

Należy jednak pamiętać, że gdy częstotliwość jest większa od MUF, wówczas fala przenika przez warstwę  $F_2$  i nawet bardzo duże zwiększenie mocy nadajnika nie doprowadzi do nawiązania połączenia. Natomiast gdy częstotliwość jest bliska LUF, wówczas można zwiększone tłumienie skompensować zwiększeniem mocy nadajnika.

Najbardziej dogodna do nawiązania łączności jest częstotliwość nieco mniejsza od MUF, gdyż podlega ona małemu tłumieniu. Zbytne zbliżanie się do MUF nie jest wskazane, gdyż w razie chwilowego zmniejszenia MUF może nastąpić zanik



Rys. 16-20. Powstawanie strefy martwej przy rozchodzeniu się fal krótkich

całkowity, tzn. zanik jonizacji granicznej. Przyjmuje się, że optymalna częstotliwość robocza (nazywana także optymalną częstotliwością trafiku), oznaczona międzynarodowo skrótem FOT<sup>1)</sup> wynosi

$$\text{FOT} = 0,85 \text{ MUF}$$

Piętnastoprocentowy margines w stosunku do MUF wystarcza do zapewnienia małego prawdopodobieństwa zaników jonizacji granicznej, przy równoczesnym małym tłumieniu sygnału w warstwie E.

Charakterystycznym zjawiskiem towarzyszącym propagacji fal krótkich jest występowanie *stref martwych*, zwanych również strefami milczenia. Powstawanie stref martwych wyjaśnia rys. 16-20. Przypuśćmy, że fala o częstotliwości  $f$  pada na jonosferę pod dostatecznie dużym kątem  $\theta$ , takim aby zachodziło odbicie fali. Jeśli teraz przy ustalonej częstotliwości będziemy zmniejszali kąt padania fali, to zgodnie z prawem secansa (14-28) wysokość  $H$  punktu odbicia będzie się zmieniała tak, aby było spełnione równanie

$$f = f_0(H) \sec \theta \quad (16-13)$$

Przy zmniejszeniu kąta padania odbicie będzie następowało na coraz większej wysokości, a promień odbity początkowo będzie padać na ziemię w coraz mniejszej odległości od nadajnika. Jednakże zwiększeniu wysokości punktu odbicia, a więc

<sup>1)</sup> Skrót nazwy francuskiej — Fréquence Optimum de Traffic.

zbliżaniu się do maksimum gęstości elektronowej, towarzyszy wzrost promienia krzywizny trajektorii fali (maleje  $dN/dH$ ). W związku z tym począwszy od pewnej wartości kąta padania  $\Theta = \Theta_{min}$  zmniejszanie tego kąta spowoduje oddalanie się punktu padania promienia odbitego na powierzchnię ziemi. Będzie tak się działo aż do wartości  $\Theta = \Theta_{0min}$ , przy której ustalona częstotliwość fali stanie się częstotliwością maksymalną jonosfery. Dalsze zmniejszanie kąta padania spowoduje oczywiście przenikanie fali przez jonosferę. Najmniejsza odległość od nadajnika, na którą zbliża się punkt padania promienia odbitego, nosi nazwę *uskoku*. Ponieważ zasięg fali powierzchniowej nie przekracza kilkudziesięciu kilometrów, a wartość uskoku wynosi przeciętnie kilkaset kilometrów lub więcej, istnieje *strefa martwa* (strefa milczenia) rozciągająca się w odległości od kilkudziesięciu do kilkuset i więcej kilometrów od nadajnika, w której natężenie pola, praktycznie biorąc, jest równe zeru.

Przy wypromieniowaniu poziomym promień odbity od warstwy  $F_2$  pada w odległości około 4000 km od nadajnika; dla warstwy  $E$  — odległość ta wynosi około 2000 km. Transmisja jednoskokowa przy odbiciu od warstwy  $F_2$  może więc mieć maksymalny zasięg 4000 km, a przy odbiciu od warstwy  $E$  — 2000 km. Odległości te są przyjmowane jako odniesienie dla nazywania tras, *trasą krótką* lub *trasą długą*. Również mapy jonosferyczne (p. 16.4.4.) są opracowywane dla wymienionych odległości.

#### 16.4.1. REGULARNE ZMIANY WARUNKÓW PROPAGACJI FAL KRÓTKICH

Stan jonosfery zależy od kąta padania promieni słonecznych oraz od aktywności słonecznej, dlatego też pora doby, pora roku i faza jedenastoletniego cyklu aktywności słonecznej decydują o warunkach propagacyjnych w zakresie fal krótkich. Warunki propagacyjne z kolei decydują o wartości MUF i LUF na trasie oraz o poziomie natężenia pola w miejscu odbioru.

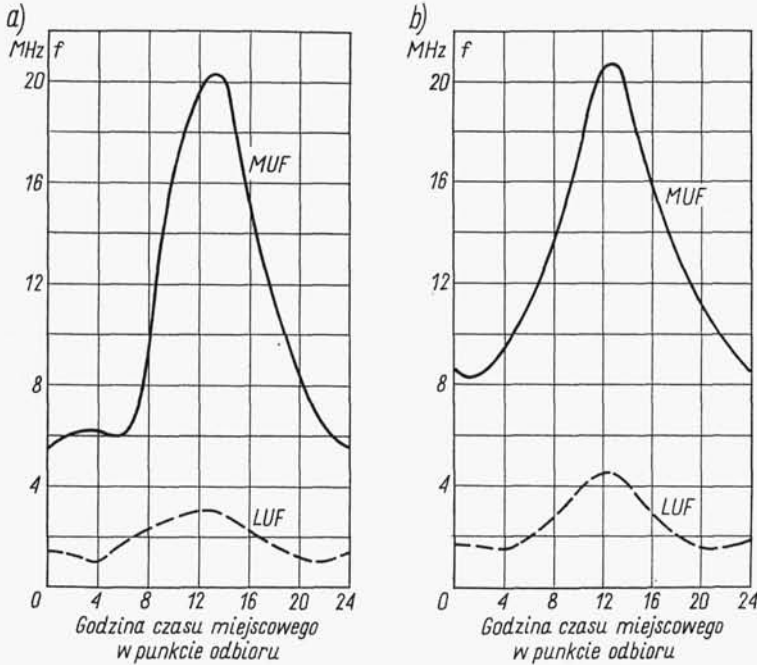
Pomijając anormalne warunki propagacji fal krótkich, można stwierdzić, że wpływ pory doby, pory roku i aktywności słonecznej na MUF objawia się w następujący sposób:

- wartości MUF są większe w porze dziennej niż w porze nocnej;
- wartości MUF w porze nocnej są większe w lecie niż w zimie;
- wartości MUF w porze dziennej dla warstwy  $F_2$  są większe w zimie niż w lecie; dla innych warstw wartości dzienne MUF są większe w lecie niż w zimie;
- wartości MUF są większe w okresach silnej aktywności słonecznej niż w okresach słabej aktywności.

Na trasach krótkich przebieg dobowy MUF charakteryzuje się wzrostem w godzinach przedpołudniowych i spadkiem w godzinach popołudniowych czasu miejscowego środka trasy. W porze zimowej przebieg MUF dla warstwy  $F_2$  charakteryzuje się wysokim maksimum i niskim minimum oraz znaczną stromością w okresach przejściowych. W porze letniej przebieg dobowy MUF jest bardziej wyrównany.

Krzywe LUF na trasach krótkich przebiegają w sposób nieskomplikowany, wykazują zawsze maksimum w godzinach południowych i spadają poniżej zakresu fal krótkich w porze nocnej. Na trasach długich krzywe LUF mają przebiegi nieregularne.

Przykładowe dobowe przebiegi MUF i LUF dla grudnia i czerwca pokazano na rys. 16-21.



Rys. 16-21. Przykładowy przebieg dobowy wartości MUF i LUF na trasie krótkiej (1500 km):  
a) grudzień; b) czerwiec

#### 16.4.2 SZCZEGÓLNE WARUNKI PROPAGACJI FAŁ KRÓTKICH

*Odbicia od warstw sporadycznych.* Istnieje określone prawdopodobieństwo nawiązania łączności za pomocą odbić od warstw sporadycznych, przy czym najważniejsza rola przypada warstwie sporadycznej  $E_s$ . Gęstość elektronowa warstwy  $E_s$  bywa niekiedy tak duża, że jej częstotliwość krytyczna jest większa od częstotliwości krytycznej warstwy  $F_2$ . Wyższe warstwy jonosferyczne są wówczas całkowicie ekranowane przez warstwę  $E_s$  nawet dla częstotliwości dochodzących do 65 MHz (w strefie zwrotnikowej w latach dużej aktywności Słońca). Niekiedy znów warstwa  $E_s$  jest tak cienka, że — pomimo znacznych lokalnych zagęszczeń w postaci jak gdyby obłoków elektronowych — staje się półprzezroczysta. Odbicia zachodzą wówczas równocześnie od warstwy  $F_2$  lub  $F_1$  i od warstwy  $E_s$ . Prawdopodobieństwo pojawienia się warstwy  $E_s$  jest na tyle duże, że propagacja dalekosiężna w zakresie

częstotliwości poniżej 15 MHz przez 25...50% czasu odbywa się za pośrednictwem warstwy  $E_S$ . Praktyczne znaczenie odbić sporadycznych polega głównie na tym, że rozszerzają one zakres częstotliwości możliwych do wykorzystania, ponieważ MUF dla warstwy  $E_S$  z reguły przewyższa MUF dla warstwy  $E$ , a często bywa większa od MUF dla warstwy  $F_2$ , zwłaszcza w porze nocnej, w okresach słabej aktywności słonecznej.

*Propagacja pozaortodromowa.* Bez względu na sposób propagacji fale krótkie rozchodzą się w normalnych warunkach jonosferycznych zasadniczo po ortodromach. Mówiąc ściślej, trajektoria fali jonosferycznej leży normalnie w płaszczyźnie wielkiego koła kuli ziemskiej. W praktyce radiokomunikacyjnej często obserwuje się odchylenia rzeczywistej drogi fali od ortodromy. Przypadek taki nazywamy propagacją pozaortodromową.

Jedną z przyczyn propagacji pozaortodromowej jest falistość jonosfery. Jak wiemy, wysokość pozorna warstwy jonosferycznej nie jest wielkością stałą w czasie. Poważniejsze zmiany wysokości warstw jonosferycznych zachodzą zwłaszcza w okresach wschodu i zachodu Słońca, gdy ulegają zmianie średnie gęstości elektronowe. Wówczas na przejściu pomiędzy obszarem oświetlonym a obszarem zacienionym następuje nachylenie pułapu jonosfery. Odbicie od warstwy nachylonej powoduje czasowe odchylenie trajektorii fali od ortodromy. Odchylenie od ortodromy może wynikać również wskutek odbić od nachylonych względem poziomu terenów w miejscu odbicia fali od ziemi.

*Zaburzenia jonosferyczne.* Przyczyną zaburzeń stanu jonosfery ziemskiej są strumienie cząstek, wysyłanych od czasu do czasu w dużych ilościach przez Słońce w wyniku wzmagającej się doraźnie, ponad przeciętną dla danego okresu normę, aktywności słonecznej. Bombardowanie korpuskularne najsilniej oddziałuje na warstwę  $F_2$ . Podczas burzy jonosferycznej maleje na ogół gęstość elektronowa i częstotliwość krytyczna tej warstwy, a wzrasta jej wysokość pozorna. Jednocześnie wzrasta absorpcja niedewiacyjna w niższych warstwach jonosfery, głównie w warstwie  $D$ . Burza jonosferyczna trwa zazwyczaj od kilku godzin do paru dni, przeważnie jednak nie dłużej niż dwie doby. Powrót jonosfery do stanu normalnego następuje stopniowo; w razie poważniejszych zaburzeń ich skutki trwają jeszcze przez kilka dni. Częstotliwość występowania burz jonosferycznych jest związana z przebiegiem jedenastoletniego cyklu aktywności słonecznej. Najwięcej zaburzeń występuje w latach maksimum plam słonecznych. Zdarza się, że burze jonosferyczne następują po sobie w tak krótkich odstępach czasu, iż jonosfera nie zdąży wrócić do stanu normalnego. Wskutek tego złe warunki łączności krótkofalowej utrzymują się przez dłuższy przeciąg czasu.

Szczególnym rodzajem zaburzenia jonosferycznego jest *zjawisko zaniku powszechnego*, inaczej zwane zjawiskiem Mögel-Dellingera. Polega ono na nagłym wzroście jonizacji warstwy  $D$ , co powoduje gwałtowny wzrost absorpcji i zanik odbioru fal krótkich, na całej półkuli ziemskiej oświetlonej przez Słońce. Zanik powszechny jest normalnie krótkotrwały; czas trwania zawiera się od kilku minut do 2...3 godzin.

Najdłużej zanik powszechny trwa na mniejszych częstotliwościach krótkofalowych, najszybciej kończy się na częstotliwościach największych. Przyczyną zaniku powszechnego są wybuchy gazów na Słońcu, objawiające się w postaci rozbłysków chromosferycznych. W czasie rozbłysku wzmagają się gwałtownie promieniowanie ultrafioletowe, a także korpuskularne i kosmiczne, którego źródłem jest Słońce. Właściwy zanik powszechny jest spowodowany przez wzmożone promieniowanie ultrafioletowe, które biegnąc z prędkością światła dochodzi do Ziemi po upływie 8 minut od chwili rozbłysku. Natomiast korpuskuły biegnąc ze znacznie mniejszą prędkością, rzędu 1600 km/s, docierają do jonosfery ziemskiej po 20...30 godzinach. Często więc w kilkadziesiąt godzin po zaniku powszechnym występują burze jonosferyczne.

*Zjawisko Dopplera.* W okresach silnego przyrostu lub ubytku gęstości elektronowej w jonosferze wysokość warstwy jonosferycznej może szybko zmieniać się w czasie. Jak wiemy, gdy fale są wysyłane przez ruchome źródło lub odbijane przez ruchomą powierzchnię, wówczas nieruchomy obserwator (antena odbiorcza) dostrzega zmianę częstotliwości fali. Jeżeli prędkość zmiany wysokości pozornej jonosfery  $v_j$  jest dużo mniejsza od prędkości światła w próżni ( $v_j \ll c$ ), to przyrost częstotliwości wywołany efektem Dopplera wyraża się wzorem

$$\Delta f = 2f \frac{v_j}{c} \sin \gamma \quad (16-14)$$

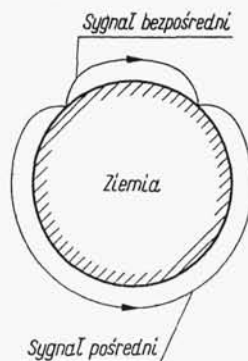
przy czym:

$f$  — częstotliwość fali padającej;

$\gamma$  — kąt elewacji.

Przyrost częstotliwości jest dodatni wówczas, gdy wysokość pozorna warstwy jonosferycznej maleje, zaś ujemny — gdy wysokość pozorna wzrasta. W zakresie fal krótkich obserwuje się zmiany częstotliwości dochodzące do kilku kiloherców.

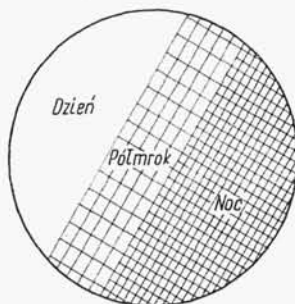
Rys. 16-22. Sygnał bezpośredni i sygnał pośredni przy odbiorze fal krótkich



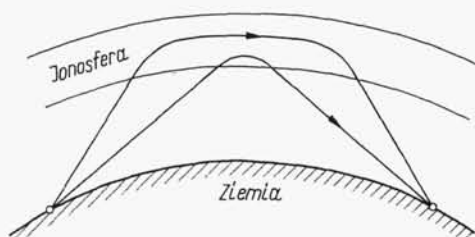
*Zjawisko echa.* W radiokomunikacji krótkofalowej sygnał z nadajnika może docierać do odbiornika od strony krótszego łuku w płaszczyźnie wielkiego koła przechodzącego przez punkt nadawania i odbioru (rys. 16-22). Jest to *sygnał bezpośredni*. Sygnał może także dotrzeć do odbiornika od strony dłuższego łuku



w płaszczyźnie wielkiego koła. Jest to *sygnał pośredni*. Sygnał pośredni dociera do odbiornika później niż sygnał bezpośredni. Jeżeli nadajnik wyśle krótki impuls, to odbiornik zarejestruje sygnał bezpośredni, a po pewnym czasie — sygnał pośredni. Nadejście sygnału pośredniego nazywane jest *echem*. Sygnały mogą być także odebrane przez odbiornik po jednorazowym lub wielokrotnym okrążeniu ziemi. Sygnał okrężny bezpośredni dociera do odbiornika od strony krótszego łuku po okrążeniu ziemi. Sygnał okrężny pośredni dociera do odbiornika od strony dłuż-



Rys. 16-23. Obszar półmroku, w którym na całej kuli ziemskiej panują podobne warunki rozchodzenia się fal krótkich



Rys. 16-24. Przyczyną ech bliskich jest wielodrogowość sygnału docierającego do odbiornika

szego łuku po okrążeniu ziemi. Czas okrążenia przez sygnał kuli ziemskiej po wielkim kole wynosi ok. 0,14 s. Na każde 1000 km różnicy dróg sygnału bezpośredniego i sygnału pośredniego wypada odstęp czasowy równy około 3 ms.

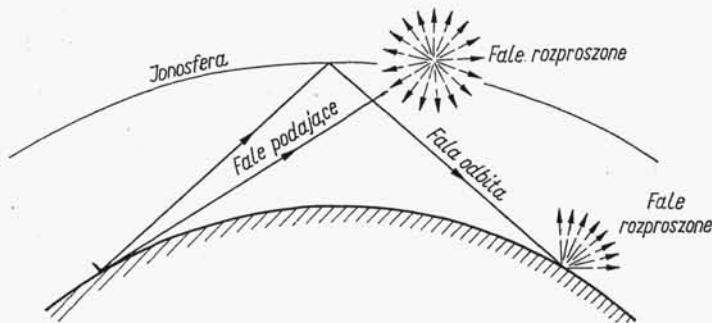
Zjawisko echa występuje najczęściej, gdy w płaszczyźnie koła wielkiego panują jednakowe warunki jonosferyczne. Warunki takie istnieją w obszarze półmroku, rozdzielającym półkulę oświetloną i zaciemnioną (rys. 16-23). Echa obserwuje się więc głównie na liniach radiokomunikacyjnych, łączących punkty położone w obszarze półmroku.

Prócz opisanych wyżej ech, nadchodzących po czasie rzędu ułamków sekundy, obserwuje się echa nadchodzące po czasie rzędu 1 ms. Są to tzw. echa bliskie. Powstają one wówczas, gdy do odbiornika docierają dwa promienie wzdłuż różnych dróg (rys. 16-24).



Echo jest w radiokomunikacji zjawiskiem niepożądanym. W radiotelegrafii echo powoduje błędy tekstu. W radiotelefonii echo objawia się przy odbiorze w postaci pogłosu, podobnego do pogłosu w dużej sali o małym tłumieniu akustycznym.

*Rozpraszanie fali jonosferycznej.* Fala jonosferyczna krótkofalowa podlega rozproszeniu na niejednorodnościach jonosfery oraz na niejednorodnościach powierzchni ziemi (rys. 16-25). Dzięki rozproszeniu jonosferycznemu na falach krótkich można nawiązać łączność przy zastosowaniu fal o częstotliwości większej od MUF. Roz-



Rys. 16-25. Rozpraszanie fal krótkich w jonosferze oraz na powierzchni ziemi

proszenie jonosferyczne jest wykorzystywane w zakresie fal ultrakrótkich. Rozpraszanie fali jonosferycznej na powierzchni ziemi powoduje pojawienie się *zwrotnej fali rozproszonej*. Zjawisko fali zwrotnej może być wykorzystane do dookólnego sondażu jonosfery metodą radarową przez wysyłanie krótkich impulsów w kierunku jonosfery i rejestrację fali zwrotnej.

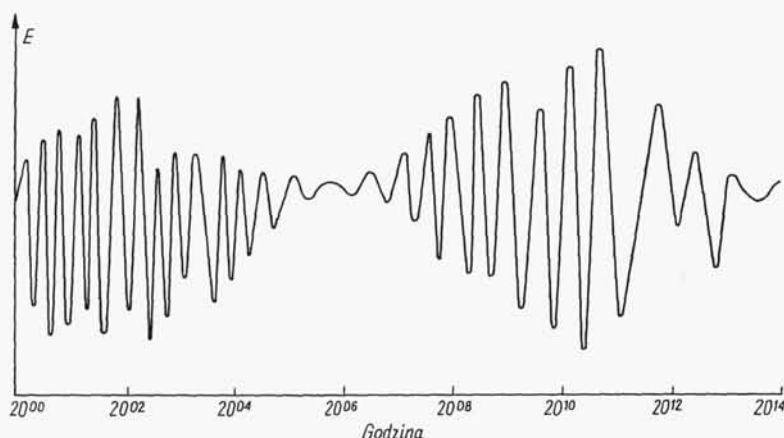
#### 16.4.3. ZANIKI PRZY ODBIORZE FAL KRÓTKICH

Zaniki przy odbiorze fal krótkich mają charakter znacznie bardziej dokuczliwy niż zaniki przy odbiorze fal średnich. Wskutek małej stabilności warstwy  $F_2$  oraz z powodu wielodrogowości sygnału, przy odbiorze fal krótkich występują częste i głębokie zmiany natężenia pola. Zaniki przy odbiorze fal krótkich w zależności od przyczyn, które powodują ich występowanie, mają różny przebieg.

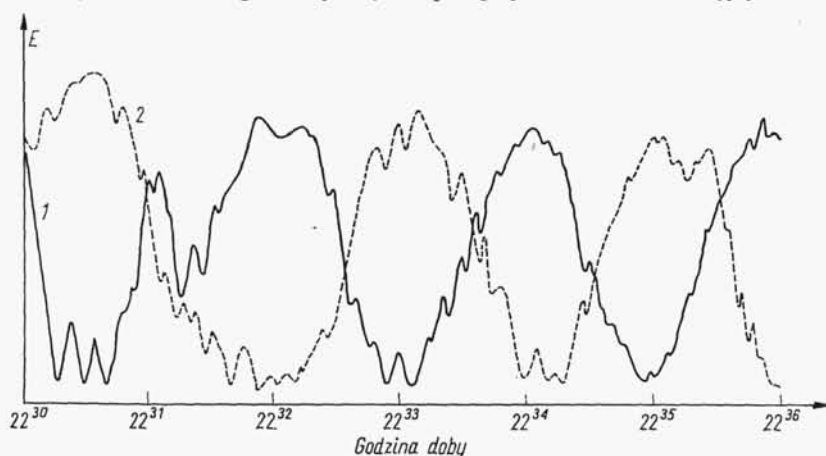
*Zanik interferencyjny* jest powodowany interferencją promieni, które dotarły do miejsca odbioru różnymi drogami. Charakter zaników interferencyjnych objaśnia przebieg z rys. 16-26.

*Zanik polaryzacyjny* powstaje przy interferencji w miejscu odbioru promienia zwyczajnego i nadzwyczajnego, które powstały wskutek rozszczepienia promienia padającego na jonosferę pod wpływem ziemskiego pola magnetycznego. Jak wiemy, promień zwyczajny i promień nadzwyczajny są spolaryzowane kołowo z przeciwnymi skrętnościami. Ponieważ amplitudy obu promieni są nierówne (podlegają one niejednakowemu tłumieniu w jonosferze), więc wypadkowe natężenie pola ma polary-

zając eliptyczną. Wskutek wahań przesunięć fazowych obu składowych kierunek osi głównej elipsy ustawicznie się zmienia. Ponieważ antena odbiera jedynie składową o określonej polaryzacji, np. pionowej, więc zmiana kierunku polaryzacji jest równoważna zmianie natężenia pola. Fluktuacje płaszczyzny polaryzacji można



Rys. 16-26. Przebieg czasowy natężenia pola przy zanikach interferencyjnych



Rys. 16-27. Wykres ilustrujący zaniki polaryzacyjne

1 — przebieg czasowy napięcia indukowanego w antenie pionowej; 2 — przebieg czasowy napięcia indukowanego w antenie poziomej

wykryć za pomocą dwóch odbiorników, zasilanych z anten o wzajemnie prostopadłych kierunkach polaryzacji. Z natury zaniku polaryzacyjnego wynika, że kiedy w jednej antenie sygnał osiąga minimum, w drugiej osiąga wtedy maksimum i odwrotnie.

Na rysunku 16-27 przedstawiono przykładowy przebieg napięć indukowanych w antenach: pionowej i poziomej w funkcji czasu. Cechą charakterystyczną zaników polaryzacyjnych są regularne, prawie okresowe zmiany natężenia pola.

*Zanik absorpcyjny* jest powodowany wahaniami tłumienia fali przez warstwę  $E$ . Występuje on głównie około południa, gdy gęstość elektronowa warstwy  $E$ , a więc i tłumienie są największe. Zmiany natężenia pola przy zaniku absorpcyjnym są powolne, a wartość średnia natężenia pola jest niewielka ze względu na duże tłumienie.

*Zanik graniczny* występuje wówczas, gdy częstotliwość transmisji jest bliska MUF. Przy chwilowych waniach gęstości elektronowej wartość MUF ulega zmianom i w pewnych okresach może być mniejsza od częstotliwości sygnału. Cechą charakterystyczną zaniku granicznego są znaczne wartości natężenia pola tuż przed wystąpieniem zaniku, gdyż tłumienie fal o częstotliwościach bliskich MUF jest małe.

*Zanik uskoku* zachodzi w miejscach znajdujących się w pobliżu uskoku danej fali, jeśli granica między strefą martwą a strefą odbioru waha się.

Opisane rodzaje zaników rzadko występują z osobna. Przeciętnie istnieje jednocześnie kilka przyczyn występowania zaników.

Zaniki mogą mieć charakter synchroniczny lub selektywny. Przy *zaniku synchronicznym* natężenie pola wszystkich składowych fali zmodulowanej ulega jednakowym wahanom. Przy *zaniku selektywnym* przeciwnie, zmiany natężenia pola poszczególnych składowych widma są różne.

#### 16.4.4. WYZNACZANIE CZĘSTOTLIWOŚCI ROBOCZYCH DLA LINII RADIOKOMUNIKACYJNYCH NA FALACH KRÓTKICH

*Obliczanie maksymalnej częstotliwości użytkowej.* Dobranie dla danej trasy radiokomunikacyjnej właściwej częstotliwości roboczej ma decydujące znaczenie, gdy chodzi o pewność połączenia. Częstotliwości robocze powinny być zbliżone do FOT. Znajomość zmienności dobowej FOT decyduje więc o doborze fal roboczych dla poszczególnych części doby. Ponieważ przyjmuje się, że  $FOT = 0,85MUF$ , więc należy wyznaczyć dla danej trasy MUF dla każdej godziny doby.

Z metod wyznaczania MUF dla danej dowolnej trasy radiokomunikacyjnej najbardziej przyjęła się metoda oparta na *ślepych mapach jonosferycznych*.

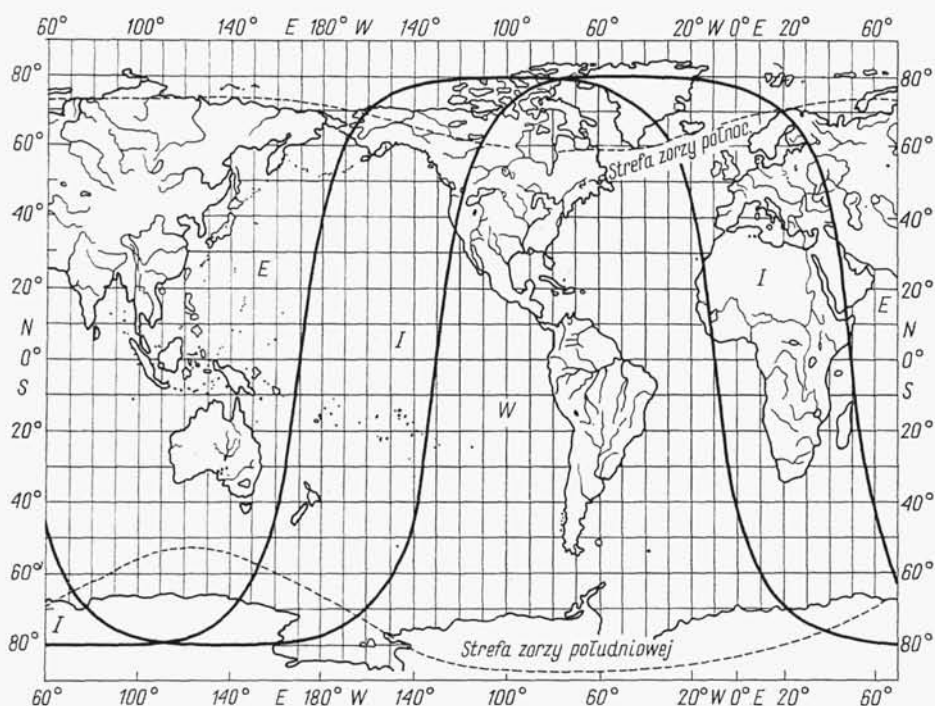
Mapy jonosferyczne podają MUF naniesione na mapę świata w rzucie Merkatora lub innym rzucie walcowym. Mapy są ślepe, tj. zamiast szerokości geograficznej jest podany czas miejscowy. Mapy takie są przygotowywane na podstawie wyników sondowań jonosfery, dokonywanych przez stacje jonosferyczne rozmieszczone na całym świecie. Na podstawie wyników uzyskanych z paru miesięcy wstecz układa się mapy przewidujące stan jonosfery do trzech miesięcy naprzód. Dane liczbowe z map noszą nazwę *prognoz jonosferycznych*. Prognozy jonosferyczne są oparte na założeniu średnich normalnych warunków miesięcznych. Prognozy te nie uwzględniają zjawisk anomalnych, jak burze jonosferyczne lub zanik powszechny.

Przy zestawieniu wyników sondowań jonosferycznych z całego świata okazało się, że stan jonosfery dla jednakowych szerokości geograficznych i jednakowego czasu miejscowego nie jest jednakowy. Przyczyną tego zjawiska, zwanego *efektem długościowym*, są nierównomierności ziemskiego pola magnetycznego. Przy sporzą-

dzaniu map jonosferycznych zaszła więc konieczność podziału powierzchni ziemi na trzy obszary, oznaczone literami  $F$ ,  $I$  oraz  $W$ , dla których są sporządzane osobne mapy. Mapa świata z naniesionymi granicami obszarów jest pokazana na rys. 16-28.

Mapy prognoz jonosferycznych są sporządzane dla warstwy  $F_2$  w dwóch wariantach:

- 1) mapa  $F_2-0$  — MUF dla wypromieniowania pionowego, a więc dla zerowej odległości od nadajnika;
- 2) mapa  $F_2-4000$  — MUF dla promienia o uskoku wynoszącym 4000 km.



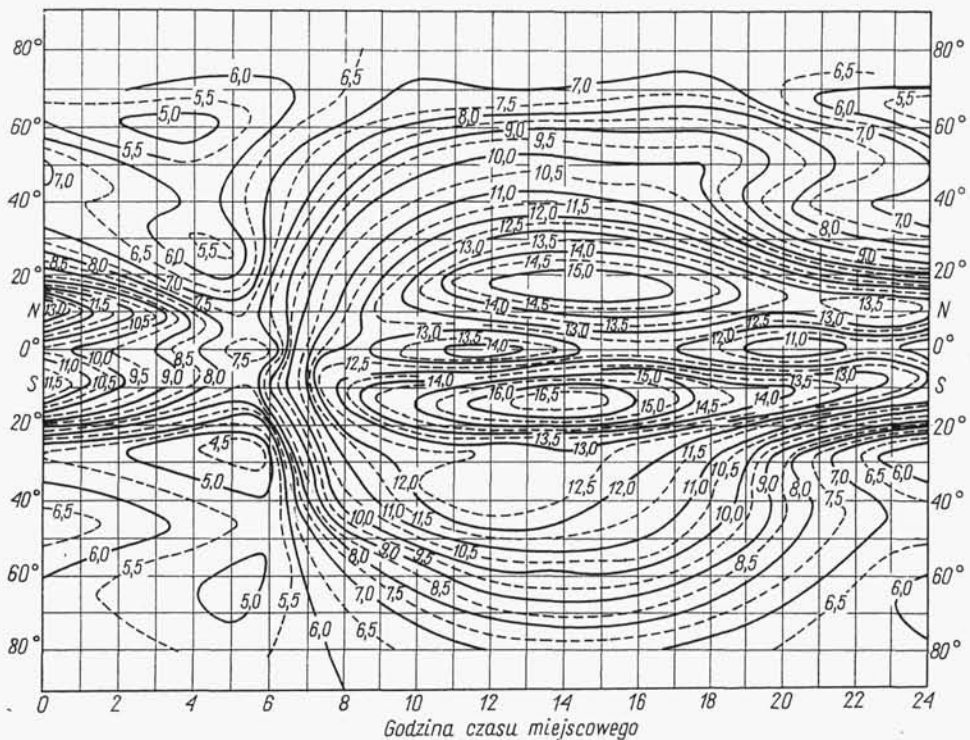
Rys. 16-28. Mapa świata w zmodyfikowanym rzucie walcowym, z podziałem na obszary E, I, W, dla których są sporządzane oddzielne mapy prognoz jonosferycznych (według Central Radio Propagation Laboratory, USA)

Odległość 4000 km odpowiada przeciętnej wartości najdłuższego uskoku przy odbiciu od warstwy  $F_2$  (wypromieniowanie styczne do powierzchni ziemi).

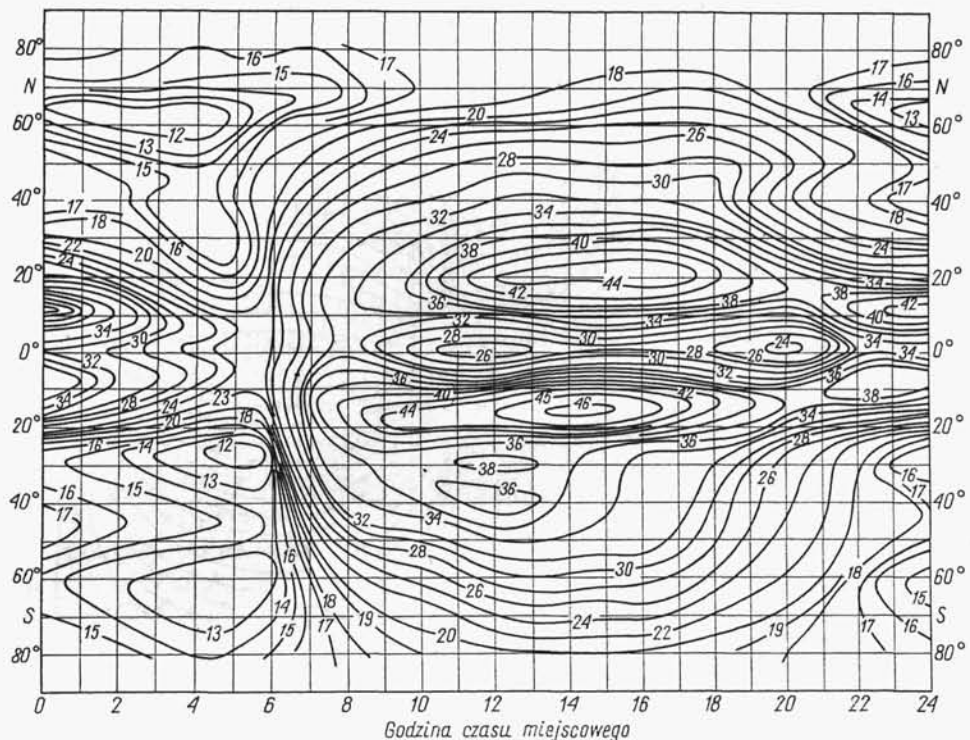
Na rysunkach 16-29 i 16-30 podano przykłady ślepych map jonosferycznych dla warstwy  $F_2$ . Przedstawione mapy nie mają charakteru uniwersalnego, są one ważne tylko dla tego okresu czasu, dla którego zostały sporządzone.

Oprócz prognoz dla warstwy  $F_2$  są także sporządzane prognozy dla warstw  $E$  i  $E_s$ .

Metoda wyznaczania MUF dla danej trasy i pory doby, przy założeniu odbicia od warstwy  $F_2$ , jest różna dla trasy o długości mniejszej od 4000 km i większej od



Rys. 16-29. Mapa  $F_2-0-MUF$ . Obszar I (według Central Radio Propagation Laboratory, USA)



Rys. 16-30. Mapa  $F_2-4000-MUF$ . Obszar I (według Central Radio Propagation Laboratory, USA)

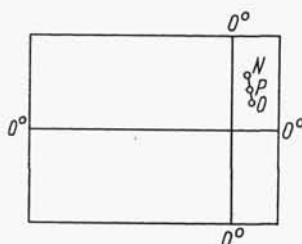
4000 km. Różnica wynika z faktu, że transmisja na odległości większe od 4000 km jest co najmniej dwuskokowa.

Sposób posługiwania się mapami jonosferycznymi przedstawimy na przykładzie liczbowym.

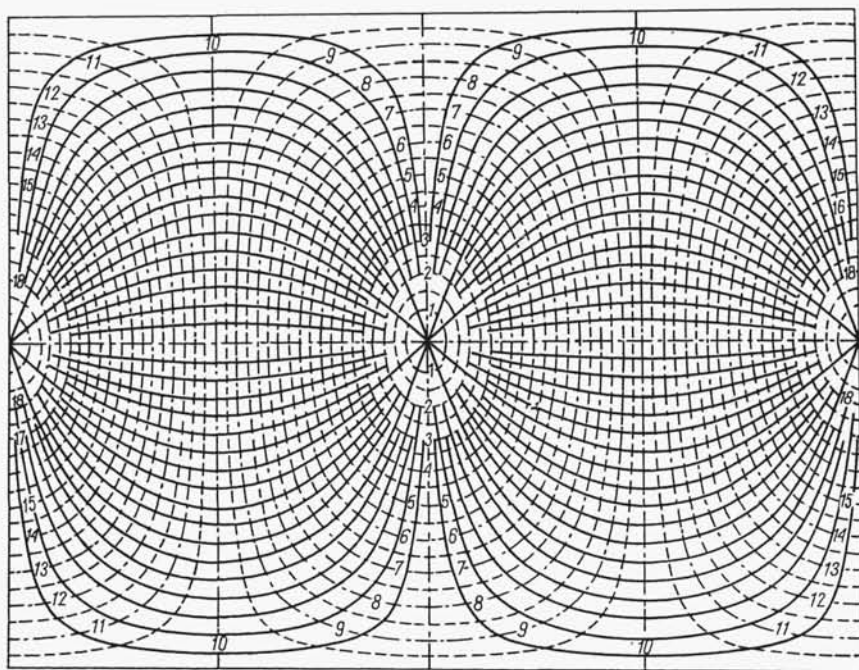
**Przykład liczbowy.** Wyznaczyć dobowe zmiany MUF, przy założeniu odbicia od warstwy  $F_2$ , dla trasy Warszawa ( $21^\circ$  E,  $52^\circ$  N) — Kair ( $30^\circ$  E,  $30^\circ$  N).

Tok obliczeń jest następujący:

1. Na mapie świata wyznaczamy punkty końcowe trasy; nadawczy  $N$  i odbiorczy  $O$ .
2. Sporządzamy kalkę o formacie odpowiadającym formatowi przyjętemu dla mapy (i wszystkich zresztą kart prognozy) z zaznaczeniem równika i południka  $0^\circ$  (rys. 16-31).
3. Na kalce sporządzonej według p. 2 zaznaczamy oba punkty końcowe trasy i przykładamy kalkę do siatki ortodrom (rys. 16-32) w taki sposób, aby równik na kalce pokrywał się z równikiem na



Rys. 16-31. Kalka obliczeniowa z wykreśloną ortodromą i zaznaczonym punktem środkowym trasy



Rys. 16-32. Siatka ortodrom dla kuli ziemskiej w zmodyfikowanym rzucie walcowym (według Central Radio Propagation Laboratory, USA)



siatce ortodrom. Przesuwamy kalkę w prawo lub w lewo tak, aby punkty krańcowe trasy znalazły się na jednej ortodromie (u w a g a: linie ortogonalne są liniami pomocniczymi do wyznaczenia odległości). Jeśli oba punkty nie wypadają na jednej krzywej, to stosujemy interpolację. Wykreślamy na kalce ortodromę, obliczamy jej długość z pomocą siatki linii ortogonalnych oraz zaznaczamy punkt środkowy trasy. W naszym przykładzie długość trasy wynosi 2600 km.

4. Przykładamy kalkę z wykreśloną ortodromą do mapy świata w celu zorientowania się, w którym obszarze znajduje się punkt środkowy trasy. W naszym przykładzie punkt środkowy trasy leży w obszarze I.

5. Wybieramy mapę  $F_2 - 0 - \text{MUF}$  dla odpowiedniego obszaru i ustawiamy kalkę na mapie w ten sposób, żeby równik na kalce pokrywał się z równikiem na mapie  $F_2 - 0 - \text{MUF}$ , zaś południk  $0^\circ$  na kalce pokrywał się z godziną 0 na mapie. Odczytujemy teraz wartość  $F_2 - 0 - \text{MUF}$  z mapy, wskazaną przez punkt środkowy trasy. Przyjmując za właściwą dla naszego przykładu mapę przedstawioną na rys. 16-29 znajdujemy wartość  $F_2 - 0 - \text{MUF}$  dla godziny 0 równą 6,5 MHz.

6. Przesuwamy kalkę wzdłuż równika tak, aby południk  $0^\circ$  na kalce pokrywał się kolejno z godziną 1, 2 itd. aż do godziny 23, odczytując za każdym razem wartość  $F_2 - 0 - \text{MUF}$  wyznaczoną przez punkt środkowy trasy. Wartości  $F - 0 - \text{MUF}$  dla naszego przykładu wynoszą: 6,2; 6,0; ...; 6,8 MHz.

7. Wybieramy mapę  $F_2 - 4000 - \text{MUF}$  dla właściwego obszaru (w naszym przykładzie będzie to mapa z rys. 6-30) i postępujemy podobnie jak w p. 5 i 6. Wartość  $F_2 - 4000 - \text{MUF}$  dla godziny 0 wynosi w naszym przykładzie 16,0 MHz.

8. Na podstawie wartości  $F_2 - 0 - \text{MUF}$  i  $F_2 - 4000 - \text{MUF}$  obliczamy wartość dla trasy o określonej długości, w naszym przypadku 2600 km. Służą do tego odpowiednie nomogramy (rys. 16-33). Uzyskane wartości MUF przedstawiamy w postaci wykresu (rys. 16-34).

9. Na podstawie wykresu przebiegu dobowego MUF (rys. 16-34) wybiera się fale robocze. W rozpatrywanym przykładzie do utrzymania radiokomunikacji w ciągu całej doby są potrzebne trzy fale robocze: 10, 15 i 20 MHz.

Procedura obliczania MUF dla tras dłuższych od 4000 km różni się nieco od opisanej wyżej procedury dla tras krótkich. Jako punkty obliczeniowe, zamiast środkowego punktu trasy, przyjmuje się tzw. punkty kontrolne, położone w następujących odległościach od obu końców trasy:

- dla warstw E i  $E_s$  — 1000 km,
- dla warstwy  $F_2$  — 2000 km.

Obliczenia dla punktów kontrolnych przeprowadza się analogicznie jak dla krótkich tras. Za wartość MUF dla całej trasy przyjmuje się najmniejszą wartość uzyskaną dla punktów kontrolnych.

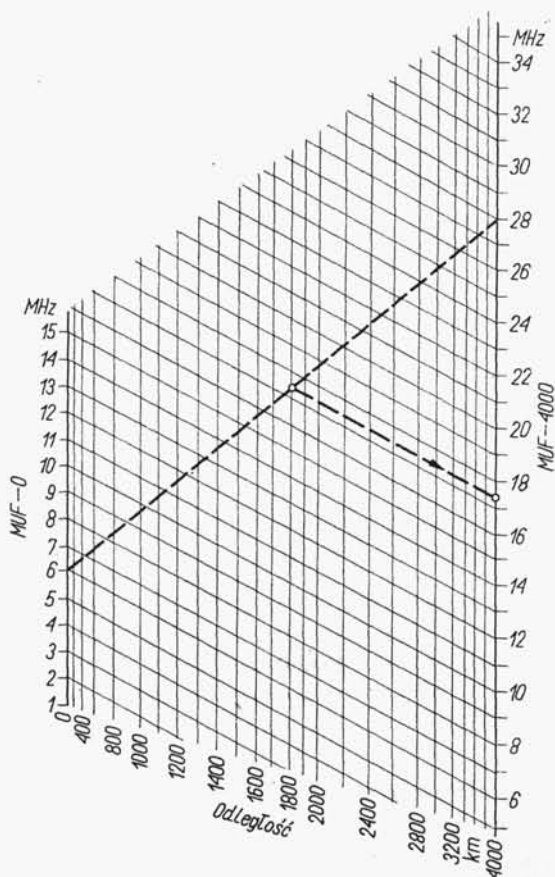
*Obliczanie natężenia pola.* Dokładne obliczenie natężenia pola fali jonosferycznej w zakresie krótkofalowym jest jednym z najtrudniejszych zagadnień propagacyjnych. Istnieje kilka metod obliczeniowych, z których żadna do tej pory nie znalazła jeszcze powszechnego uznania.

Przykładowo omówimy tu metodę Kazancewa [14, 28]. Według tej metody pole w miejscu odbioru jest wynikiem interferencji promieni odbitych od jonosfery różną ilość razy. Wypadkowe natężenie pola oblicza się ze wzoru

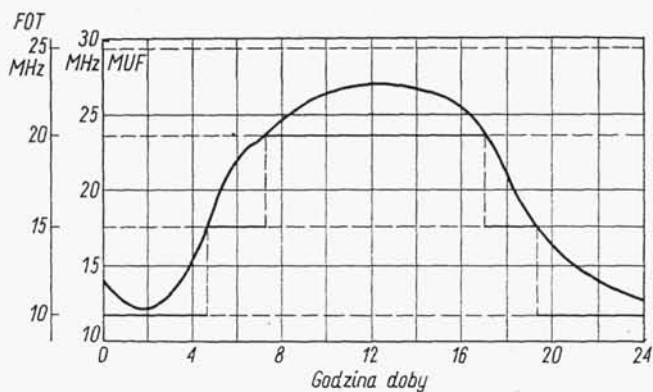
$$E_{sk} = \sqrt{\sum_{m=1}^M E_{skm}^2} \quad (16-15)$$

w którym liczba promieni  $M$  nie przewyższa nigdy trzech.





Rys. 16-33. Nomogram do przeliczania MUF dla warstwy  $F_2$  na określoną długość trasy (według Central Radio Propagation Laboratory, USA)



Rys. 16-34. Przebieg dobowy MUF i FOT dla trasy Warszawa-Kair

Medianę natężenia pola w mV/m dla poszczególnych promieni oblicza się z zależności

$$E_{skm} = \frac{173 \sqrt{PG_1}}{r} W_m \quad (16-16)$$

przy czym:

$r$  — odległość między nadajnikiem i odbiornikiem mierzona wzdłuż powierzchni ziemi [km];

$G_1$  — zysk energetyczny anteny nadawczej w stosunku do źródła izotropowego [W/W];

$W_m$  — współczynnik osłabienia określony wzorem

$$W_m = \frac{1}{2} \left( \frac{1+R}{2} \right) R^{N-1} e^{-\sum_{k=1}^N \Gamma_k} \quad (16-17)$$

przy czym:

$R$  — moduł współczynnika odbicia od powierzchni ziemi;

$N$  — liczba odbić od jonosfery;

$\Gamma_k$  — współczynnik tłumienia przy  $k$ -tym odbiciu.

Współczynnik tłumienia przy  $k$ -tym odbiciu uwzględnia tłumienie przy dwukrotnym przenikaniu fali przez warstwy  $D$ ,  $E$   $F_1$  oraz przy odbiciu od warstwy  $F_2$

$$\Gamma_k = \Gamma_D + \Gamma_E + \Gamma_{F_1} + \Gamma'_{F_2} \quad (16-18)$$

W przypadku gdy fala odbija się od warstwy  $E$ , wzór (16-18) upraszcza się do postaci

$$\Gamma_k = \Gamma_D + \Gamma'_E \quad (16-19)$$

przy czym  $\Gamma'_E$  — tłumienie przy odbiciu od warstwy  $E$ .

Cząstkowe współczynniki tłumienia zależą od kąta padania na dolną granicę warstwy jonosferycznej  $\Theta_0$ , od częstotliwości krytycznej danej warstwy  $f_{kr}$  oraz od aktualnej częstotliwości roboczej (rys. 16-35).

Współczynniki tłumienia dla innych częstotliwości krytycznych niż podane na rys. 16-35 można przeliczyć według wzoru

$$\Gamma = \Gamma_{f_{kr0}} \left( \frac{f_{kr}}{f_{kr0}} \right)^2 \quad (16-20)$$

przy czym:

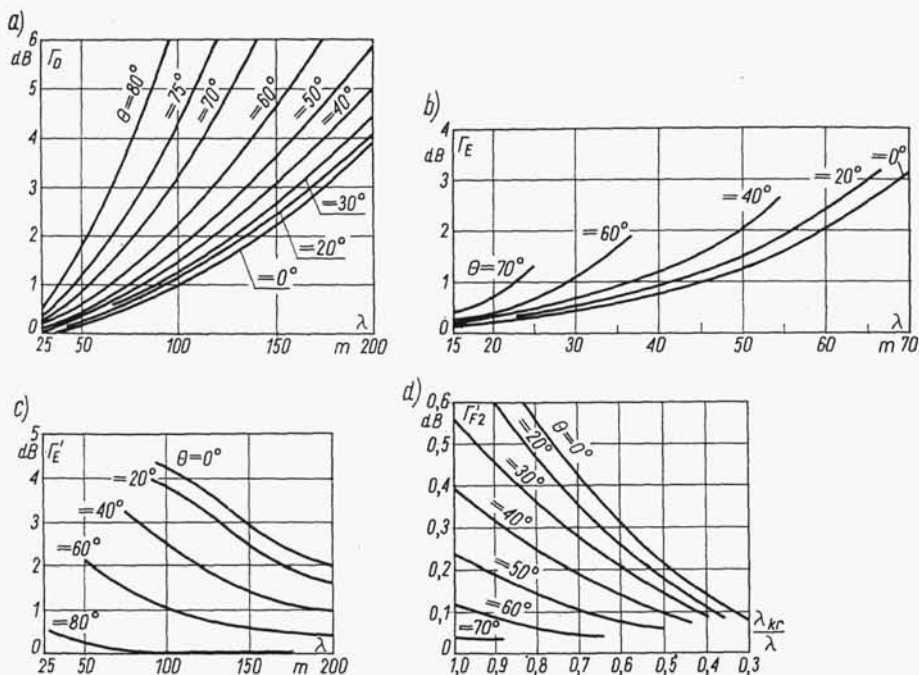
$f_{kr}$  — rzeczywista wartość częstotliwości krytycznej dla danej warstwy;

$f_{kr0}$  — wartość częstotliwości krytycznej, dla której sporządzono wykres współczynnika tłumienia;

$\Gamma_{f_{kr0}}$  — wartość współczynnika tłumienia odczytana z wykresu.

Doświadczenia przeprowadzone przez Kazancewa wskazują, że wartości obliczone na podstawie wzoru (16-15) odpowiadają medianom natężenia pola dla dostatecznie długich okresów obserwacji (rzędu miesiąca). Wyniki innych prac doświadczalnych

wskazują, że powolne wahania natężenia pola są podporządkowane rozkładowi logarymicznie normalnemu o odchyleniu standardowym wynoszącym 8 dB. Na powolne wahania nakładają się szybkie zmiany natężenia pola (zaniki), które w granicach krótkich przedziałów czasowych (około 10 min) podporządkowują się rozkładowi Rayleigha. Szybkie zmiany natężenia pola mogą być skompensowane przez



Rys. 16-35. Częstkowe współczynniki tłumienia: a), przy przechodzeniu przez warstwę  $D$ ,  $\nu = 10^7$  1/s;  $N = 10^9$  1/m<sup>3</sup>; b) przy przechodzeniu przez warstwę  $E$ ,  $f_{kr} = 4$  MHz; c) przy odbiciu od warstwy  $E$ ,  $f_{kr} = 4$  MHz; d) przy odbiciu od warstwy  $F_2$ ,  $f_{kr} = 5,7$  MHz (według M. П. Доуляханов: Распространение радиоволн. Изд. Связь, Москва 1965)

zastosowanie odbioru zbiorczego [58] przy użyciu dwóch, trzech, a nawet czterech anten. Odbiór z czterema antenami, praktycznie biorąc całkowicie kompensuje szybkie zmiany pola.

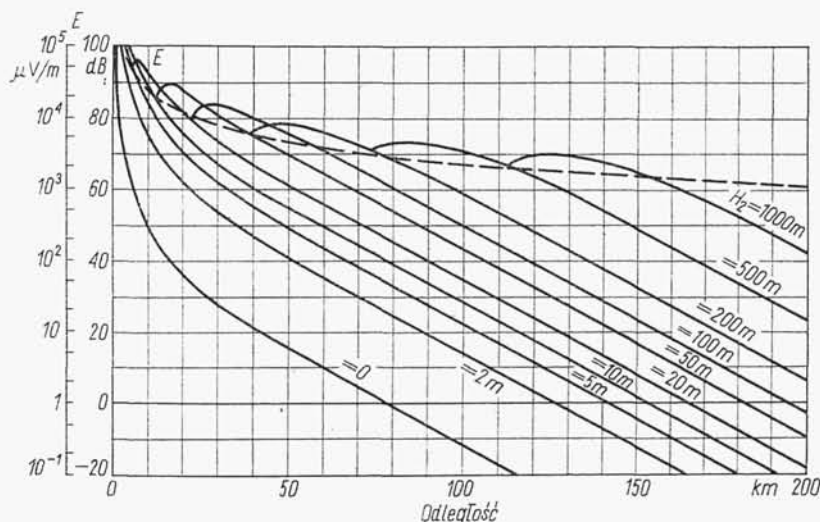
**Obliczanie najmniejszej częstotliwości użytkowej.** Wyznaczenie LUF polega na znalezieniu częstotliwości, przy której natężenie pola w miejscu odbioru, przy założonej mocy promieniowanej po stronie nadawczej, jest równe minimalnemu natężeniu pola dla danej służby i rodzaju emisji. Przy wyznaczaniu LUF należy uwzględnić zmienność w funkcji częstotliwości zarówno współczynnika osłabienia jak i minimalnego natężenia pola (wskutek zmienności poziomu zakłóceń atmosferycznych). Okoliczność ta poważnie komplikuje obliczenia LUF, które trzeba by w zasadzie prowadzić metodą kolejnych przybliżeń. Dla uniknięcia tych kłopotów, opracowano

specjalne nomogramy do obliczania LUF [10], których ze względu na brak miejsca nie będziemy tu omawiać. Należy tylko zwrócić uwagę na to, że przebiegi LUF na jednej i tej samej trasie i w tych samych warunkach mogą być różne dla obu końców trasy, ze względu na różne poziomy zakłóceń atmosferycznych.

## 16.5. ROZCHODZENIE SIĘ FAL ULTRAKRÓTKICH I MIKROFAL

Fale ultrakrótkie i mikrofałe obejmują zakres częstotliwości radiowych powyżej 30 MHz. Zakres ten dzieli się na cztery podzakresy:

- fale metrowe — od 10 m do 1 m (30...300) MHz;
- fale decymetrowe — od 1 m do 10 cm (300...3000) GHz;
- fale centymetrowe — od 10 cm do 1 cm (3...30) GHz;
- fale milimetrowe — od 10 mm do 1 mm (30...300) GHz.



Rys. 16-36. Krzywe natężenia pola w funkcji odległości dla częstotliwości 150 MHz i polaryzacji poziomej. Wysokość zawieszenia: anteny nadawczej  $H_1 = 200$  m, anteny odbiorczej  $H_2 = \text{par.}$ ; parametry elektryczne gruntu:  $\sigma = 0,01$  S/m,  $\epsilon_r = 10$  (według I Atlasu CCIR)

Fale ultrakrótkie wykazują przy rozchodzeniu się w otoczeniu ziemi właściwości quasi-optyczne, to jest w zasadzie rozchodzą się zgodnie z prawami optyki geometrycznej. Gdyby prawa optyki geometrycznej obowiązywały ściśle, wówczas odbiór na falach ultrakrótkich byłby możliwy tylko w granicach zasięgu optycznego. W rzeczywistości można wyróżnić zjawiska, które powodują, że fale docierają poza zasięg optyczny. Spośród tych zjawisk główną rolę odgrywają:

- refrakcja fal w troposferze;