

## РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R P.684-4

**Прогнозирование напряженности поля на частотах ниже  
приблизительно 150 кГц**

(Вопрос МСЭ-R 225/3)

(1990-1994-2001-2003-2005)

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

*учитывая,*

- a) что существует необходимость в руководстве для инженеров, занимающихся планированием радиослужб в диапазоне частот ниже приблизительно 150 кГц;
- b) что были разработаны следующие методы:
  - скачковый метод для частот выше приблизительно 60 кГц, основанный на статистическом анализе результатов измерений напряженности поля в диапазоне от 16 кГц до приблизительно 1000 кГц;
  - метод волноводной моды для частот ниже приблизительно 60 кГц, основанный на теоретической модели Земли и ионосферы, в которой параметры ионосферной модели получены по данным распространения радиоволн;
  - метод для частотного диапазона 150–1700 кГц, описанный в Рекомендации МСЭ-R P.1147,

*рекомендует,*

**1** чтобы следующие методы использовались для прогнозирования напряженности поля, с обязательным учетом предостережений относительно точности их применения в некоторых районах, о которых говорится в Приложении 2.

## **1 Введение**

Существуют два теоретических метода расчета напряженности поля КНЧ, ОНЧ и НЧ сигналов.

Следует отметить, что информация в этой Рекомендации содержит значения  $f \cos i$ , превышающие 150 кГц. Использование данной информации для частот, превышающих 150 кГц, не рекомендуется. В Рекомендации МСЭ-R P.1147 приведена информация для частот выше 150 кГц.

**1.1** Скачковый метод – это метод, при котором траектории распространения электромагнитной энергии между данными передатчиком и приемником могут быть описаны геометрически, как в случае распространения ВЧ.

Этот метод используется на НЧ и, для расстояний меньших 1000 км, – на ОНЧ. В данном методе рассматривается радиопередача, осуществляемая по определенным трассам, геометрия которых определяется однократным или многократным отражением от ионосферы в зависимости от того, один или несколько скачков включает рассматриваемая трасса распространения, а также механизмами распространения земной волной. Таким образом, результирующее поле представляет собой векторную сумму полей, образуемых сигналами на каждой трассе. Так как речь идет о длинных волнах, то необходимо учитывать их дифракцию земной поверхностью, что не распространяется на диапазон ВЧ. Применение скачкового метода может обуславливаться тем фактом, что в случае наклонного падения размеры интервала высот, в пределах которого происходит распространение, равны или больше нескольких длин волн.

Для применения этого метода необходимо знать значения коэффициентов отражения волны, падающей на ионосферу. Эти коэффициенты сильно меняются в зависимости от частоты, длины, а также географических и геомагнитных координат трассы передачи, времени суток, времени года и фазы цикла солнечной активности. Необходимо также знать электрические характеристики почвы (проводимость и диэлектрическую проницаемость) в месте расположения передатчика и приемника, поскольку конечная величина проводимости почвы влияет на диаграммы направленности антенн терминалов в вертикальной плоскости.

**1.2** Метод волноводной моды используется в диапазоне ОНЧ для расстояний больше 1000 км. В этом методе распространение радиоволн рассматривается как сумма волн, соответствующих различным типам распространения в волноводе Земля–ионосфера, аналогично моде, определенной применительно к волноводам в микроволновом диапазоне. Выбор метода для расчета напряженности поля определяется практическими соображениями, связанными с численными расчетами.

**1.3** В диапазоне ОНЧ на расстояниях менее 1000 км и в общем случае на НЧ ряды мод сходятся незначительно, и поэтому вычисления связаны с процедурой векторного сложения большого количества компонент. С другой стороны, скачковая теория оперирует ограниченным числом трасс, включая трассу земной волны, что особенно удобно, когда речь идет о распространении НЧ на большие расстояния, с учетом дифракции, если это возможно.

В диапазоне ОНЧ на расстояниях более 1000 км скачковая теория предполагает векторное сложение большого количества напряженностей полей, создаваемых сигналами, распространяющимися по различным трассам, тогда как из-за быстрой конвергенции ряда мод приемлемую точность можно получить лишь при сложении небольшого числа мод. Следовательно, для этого типа распространения больше подходит модовая теория. Распространение на КНЧ также можно описать в виде единственной волноводной моды.

## 2 Скачковая теория распространения

### 2.1 Общее описание

В соответствии с этой теорией поле пространственной волны (напряженность и фаза) в какой-либо точке считается векторной суммой полей, создаваемых различными волнами, распространяющимися непосредственно от передатчика путем одного или нескольких скачков. Таким образом, общее поле в этой точке является векторной суммой поля волны, дифрагированной землей, и поля пространственной волны.

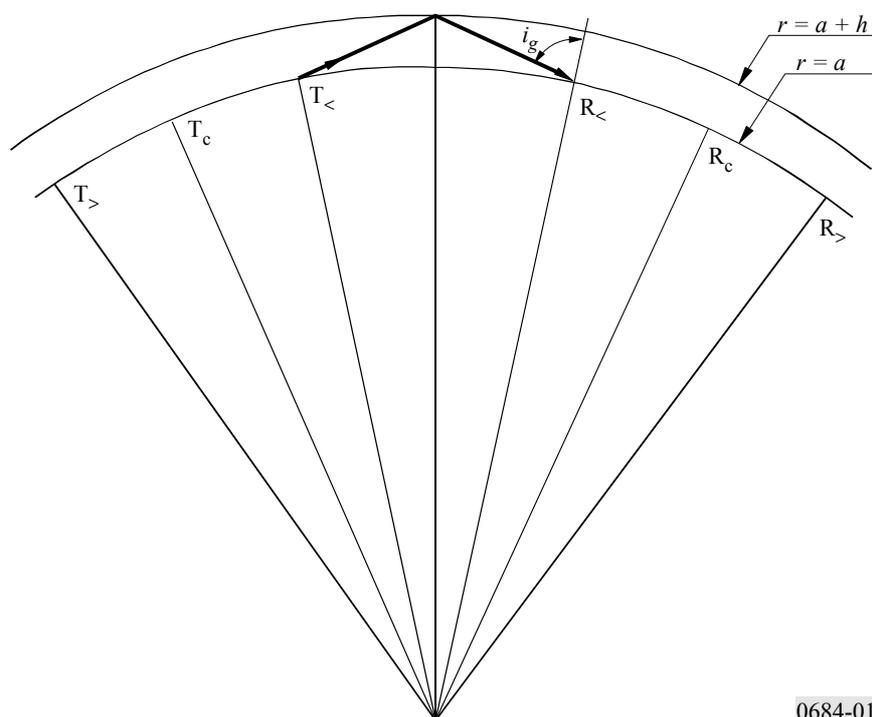
Напряженность поля пространственной волны рассчитывается с помощью лучевой теории в тех областях, где применимы методы геометрической оптики, и путем интегрирования дифракционных эффектов или применения полной волновой теории там, где методы геометрической оптики уже использовать нельзя.

Геометрия трассы, включающей один скачок, показана на рисунке 1.

Поверхность Земли определяется как  $r = a$ , а ионосферный слой с гладкой отражающей поверхностью расположен на высоте  $r = a + h$ . Удобно выделить три случая. В первом из них приемная антенна, расположенная в точке  $R_<$ , облучается претерпевшей однократное отражение пространственной волной от передающей антенны, расположенной в точке  $T_<$ , где  $i_g$  меньше  $\pi/2$ . Во втором две антенны расположены в критических точках  $T_c$  и  $R_c$ , для которых  $i_g = \pi/2$ . В третьем случае антенны расположены в точках  $T_>$  и  $R_>$  за пределами критических точек, так что первый скачок пространственной волны попадает в дифракционную зону или зону радиотени.

РИСУНОК 1

Геометрия траектории луча в скачковой теории распространения радиоволн  
(первый скачок пространственной волны)



0684-01

## 2.2 Расчет напряженности поля методом лучевых траекторий

Симметричная сила, соответствующая электрическому полю, излучаемому коротким вертикальным электрическим диполем, определяется как:

$$V_u = 300 \sqrt{p_t} \quad \text{В}, \quad (1)$$

где  $p_t$  – излучаемая мощность (кВт).

Напряженность поля нисходящей пространственной волны перед отражением от земной поверхности вблизи приемной антенны можно выразить как:

$$E_t = \frac{V_u}{L} \cos \psi \parallel R_{\parallel} D F_t \quad \text{мВ/м}, \quad (2)$$

где:

- $L$ : длина трассы пространственной волны (км);
- $\parallel R_{\parallel}$ : коэффициент отражения от ионосферы, который представляет собой отношение составляющих электрического поля, параллельных плоскости падения;
- $D$ : коэффициент ионосферной фокусировки;
- $F_t$ : поправочный коэффициент передающей антенны;
- $\psi$ : угол выхода и прихода пространственной волны у поверхности земли по отношению к горизонтالي.

Если прием осуществляется с помощью небольшой рамочной антенны, расположенной на поверхности земли в плоскости распространения, эффективное значение напряженности поля пространственной волны имеет вид:

$$E_s = \frac{2V_u}{L} \cos \psi \parallel R_{\parallel} D F_t F_r \quad \text{мВ/м} \quad (3)$$

При приеме на короткую вертикальную антенну уравнение (3) преобразуется следующим образом:

$$E_s = \frac{2V_u}{L} (\cos \psi)^2 \|R_{\parallel}\| D F_t F_r \quad \text{мВ/м}, \quad (4)$$

где  $F_r$  – соответствующий поправочный коэффициент приемной антенны.

При распространении на большие расстояния скачковый метод можно применять к пространственным волнам, претерпевшим несколько отражений от ионосферы. Например, для двухскачковой пространственной волны напряженность поля в точке расположения рамочной приемной антенны можно просто представить как:

$$E_s = \frac{2V_u}{L} \cos \psi \|R_{1\parallel}\| \|R_{2\parallel}\| D^2 D_G \|R_{g\parallel}\| F_t F_r \quad \text{мВ/м}, \quad (5)$$

где:

- $D_G$ : коэффициент дивергенции, вызванной сферичностью Земли, равный примерно  $D^{-1}$ ;
- $\|R_{g\parallel}\|$ : эффективный коэффициент отражения от Земли с конечным значением проводимости;
- $L$ : общая длина траектории распространения при двухскачковой траектории лучей;
- $\|R_{1\parallel}\|$  и  $\|R_{2\parallel}\|$ : коэффициенты ионосферного отражения для первого и второго отражений.

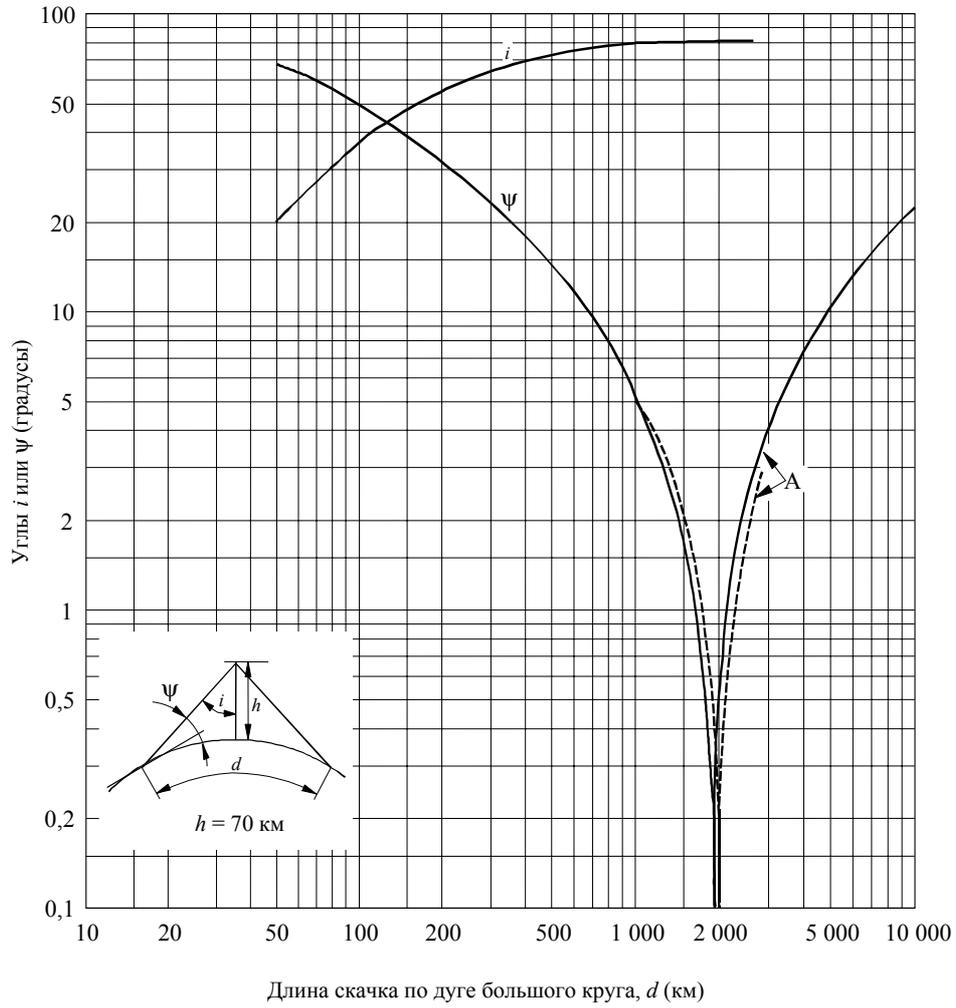
Коэффициенты ионосферного отражения, как правило, не одинаковы, так как падающие волны имеют разную поляризацию. Однако в приведенном здесь упрощенном методе расчета уровней напряженности поля в случае падения волн под сильно наклонными углами в первом приближении  $\|R_{1\parallel}\| = \|R_{2\parallel}\|$ .

### 2.2.1 Углы места и углы падения на ионосферу

Геометрия траектории луча, используемая для определения углов выхода и прихода пространственной волны на поверхность земли,  $\psi$ , и углов падения на ионосферу,  $i$ , показана на рисунках 2 и 3. Эти углы показаны на рисунке 2 для эффективной высоты отражения, равной 70 км, что соответствует типичным условиям распространения в дневное время, а на рисунке 3 – для эффективной высоты отражения, равной 90 км, что соответствует типичным условиям распространения в ночное время. Влияние атмосферной рефракции на величину углов выхода и прихода представлено пунктирной кривой, хотя на частотах ниже примерно 50 кГц эта кривая, вероятно, будет некорректной.

РИСУНОК 2

Углы выхода и прихода волны,  $\psi$ , и углы падения на ионосферу,  $i$ , для типичных условий распространения в дневное время ( $h = 70$  км).  
Пунктирная кривая отражает влияние атмосферной рефракции

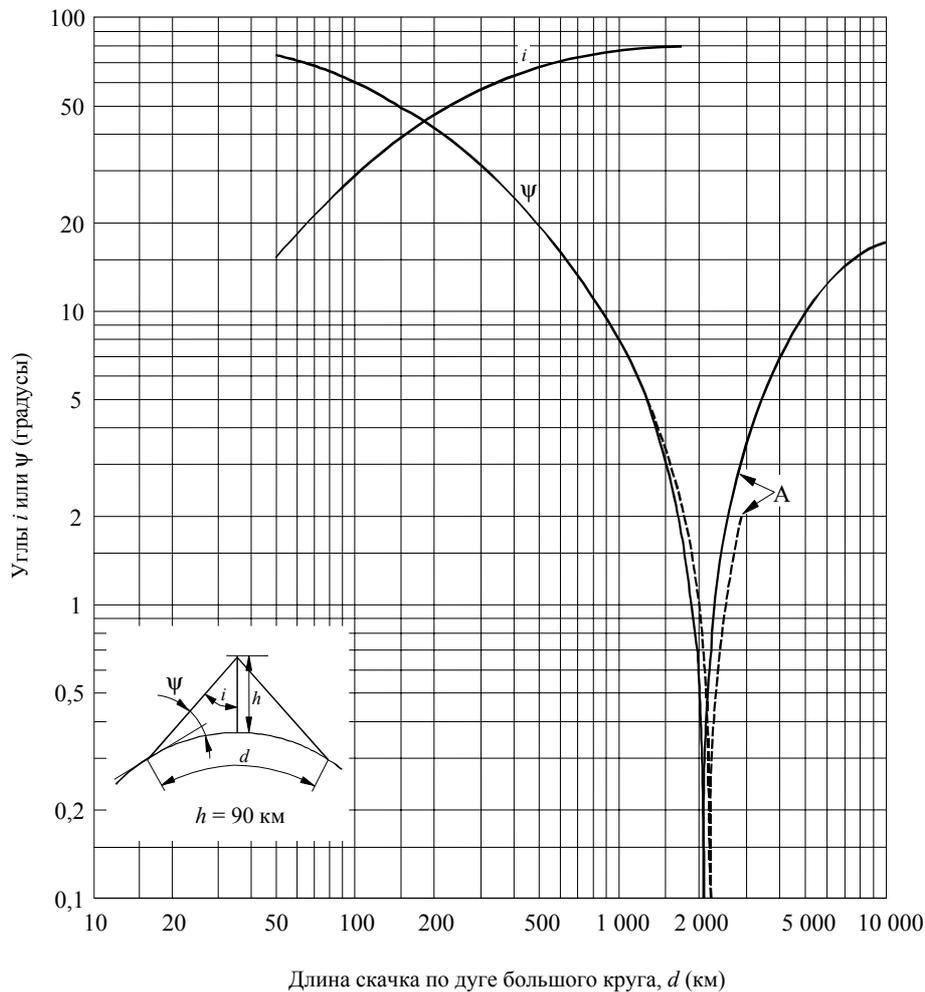


A: отрицательные  $\psi$

0684-02

РИСУНОК 3

Углы выхода и прихода волны,  $\psi$ , и углы падения на ионосферу,  $i$ , для типичных условий распространения в ночное время ( $h = 90$  км).  
Пунктирная кривая отражает влияние атмосферной рефракции



A: отрицательные  $\psi$

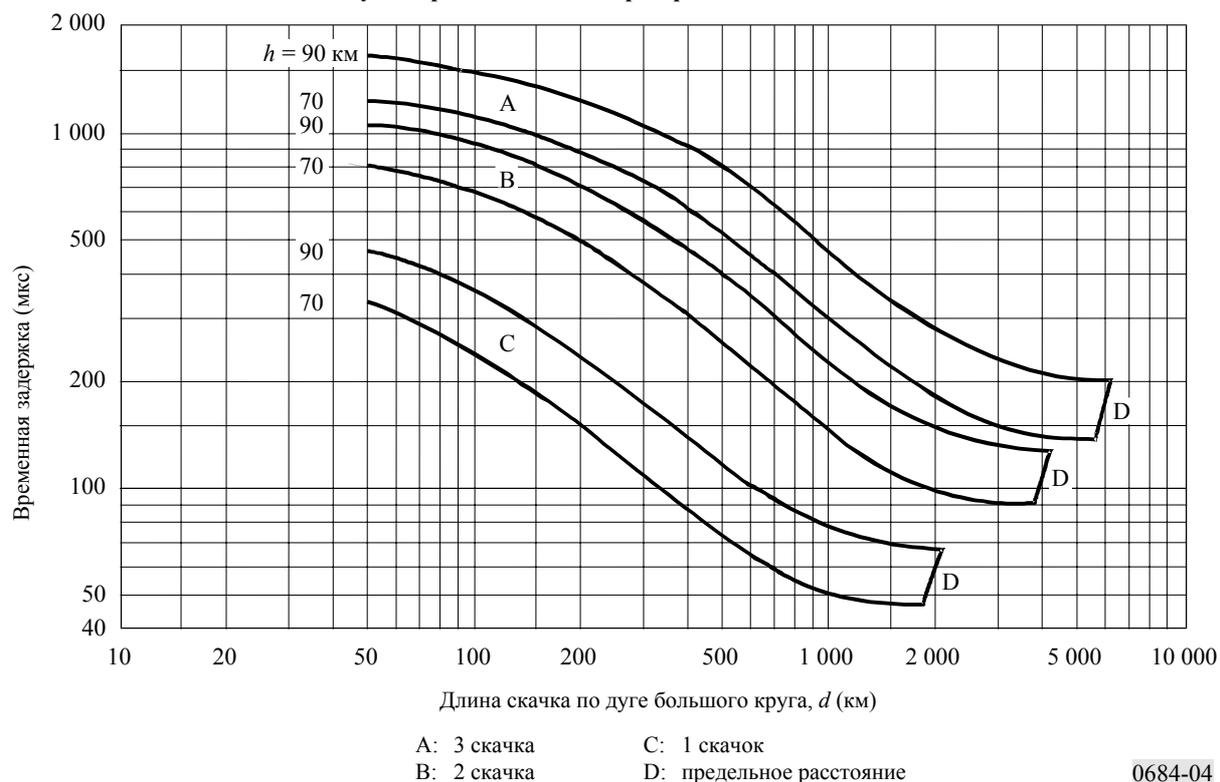
0684-03

### 2.2.2 Длина трассы и дифференциальная временная задержка

Для расчета длины трассы пространственной волны,  $L$ , и получения оценок суточных изменений фазы используется рисунок 4. На нем показана дифференциальная временная задержка между поверхностной волной и одно-, двух- или трехскачковой пространственной волной при высоте отражения от ионосферы, равной 70 и 90 км, что соответствует условиям распространения в дневное и ночное время. Скорость распространения полагается равной  $3 \times 10^5$  км/с.

РИСУНОК 4

Дифференциальная временная задержка между поверхностной волной и одно-, двух- и трехскачковыми пространственными волнами



### 2.2.3 Коэффициент фокусировки

Коэффициент ионосферной фокусировки,  $D$ , для сферической Земли и ионосферы показан на рисунке 5 для дневных условий и на рисунке 6 для ночных условий.

### 2.2.4 Поправочные антенные коэффициенты

Поправочные антенные коэффициенты,  $F_t$  и  $F_r$ , которые учитывают влияние кривизны Земли и конечной проводимости на диаграмму направленности передающей и приемной антенн в вертикальной плоскости, показаны на рисунках 7–9. Эти коэффициенты были рассчитаны для условий суши, моря и льда, которые различаются по своим электрическим характеристикам (проводимость и диэлектрическая проницаемость), как это показано в таблице 1.

РИСУНОК 5

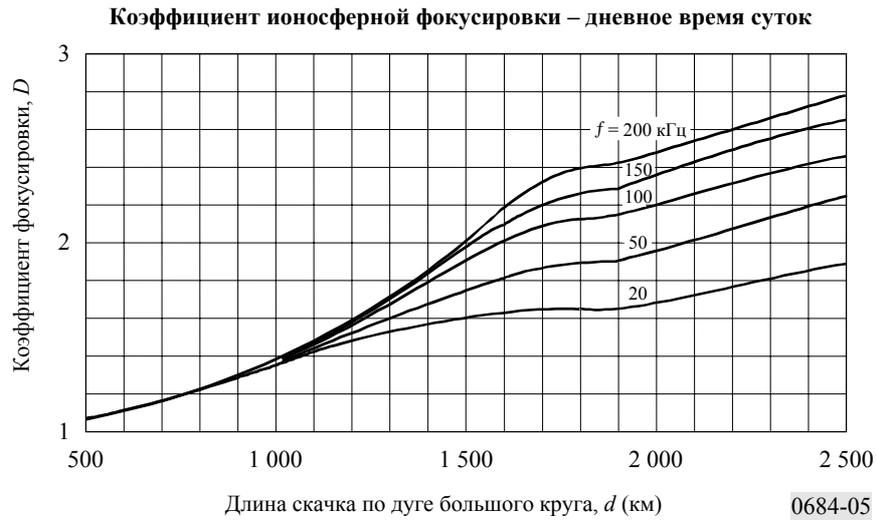


РИСУНОК 6

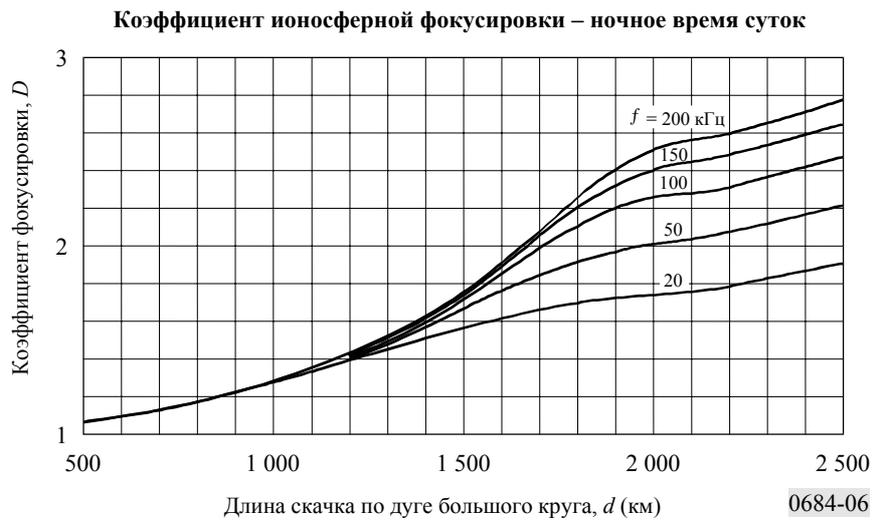
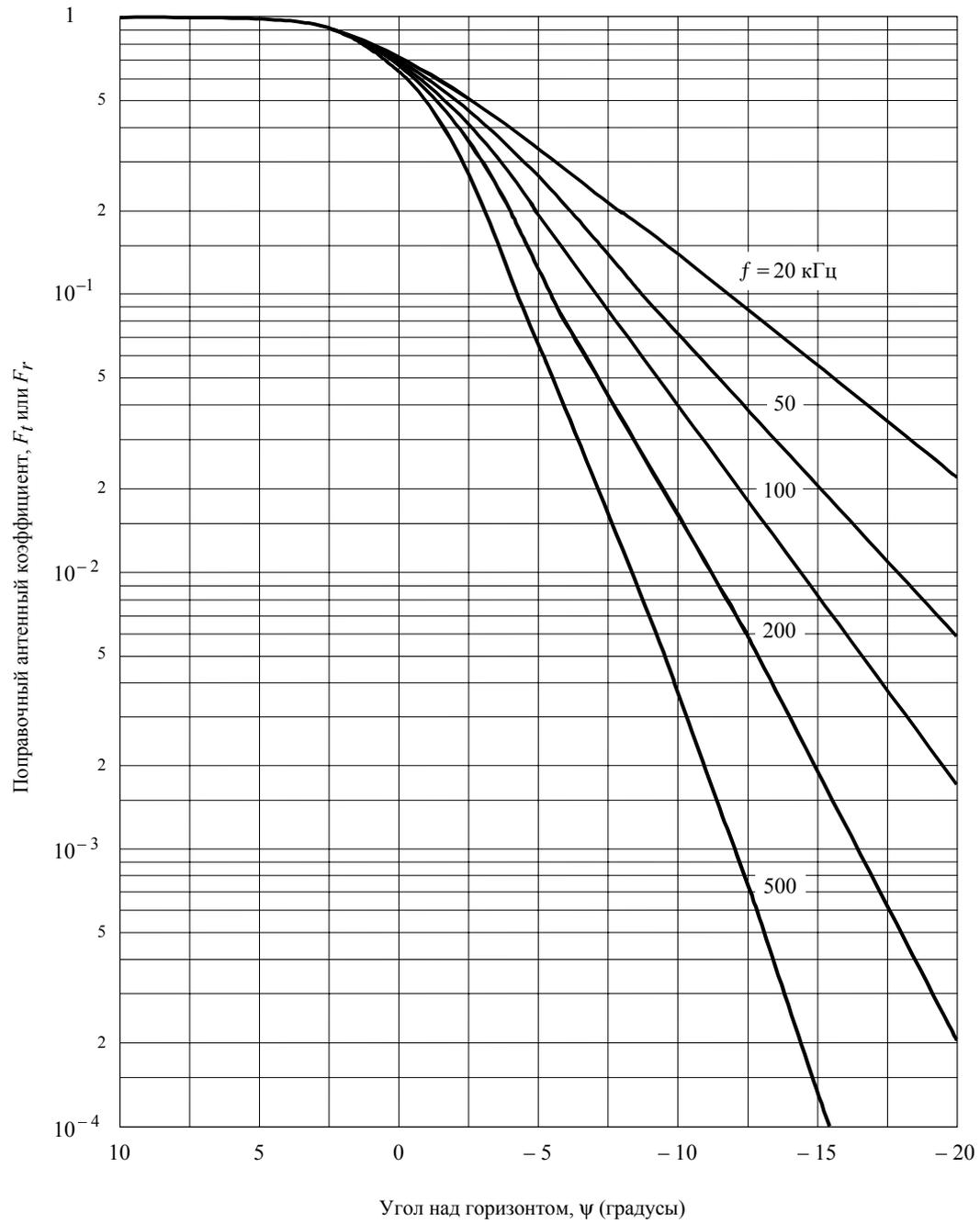


РИСУНОК 7

## Поправочный антенный коэффициент – морская вода

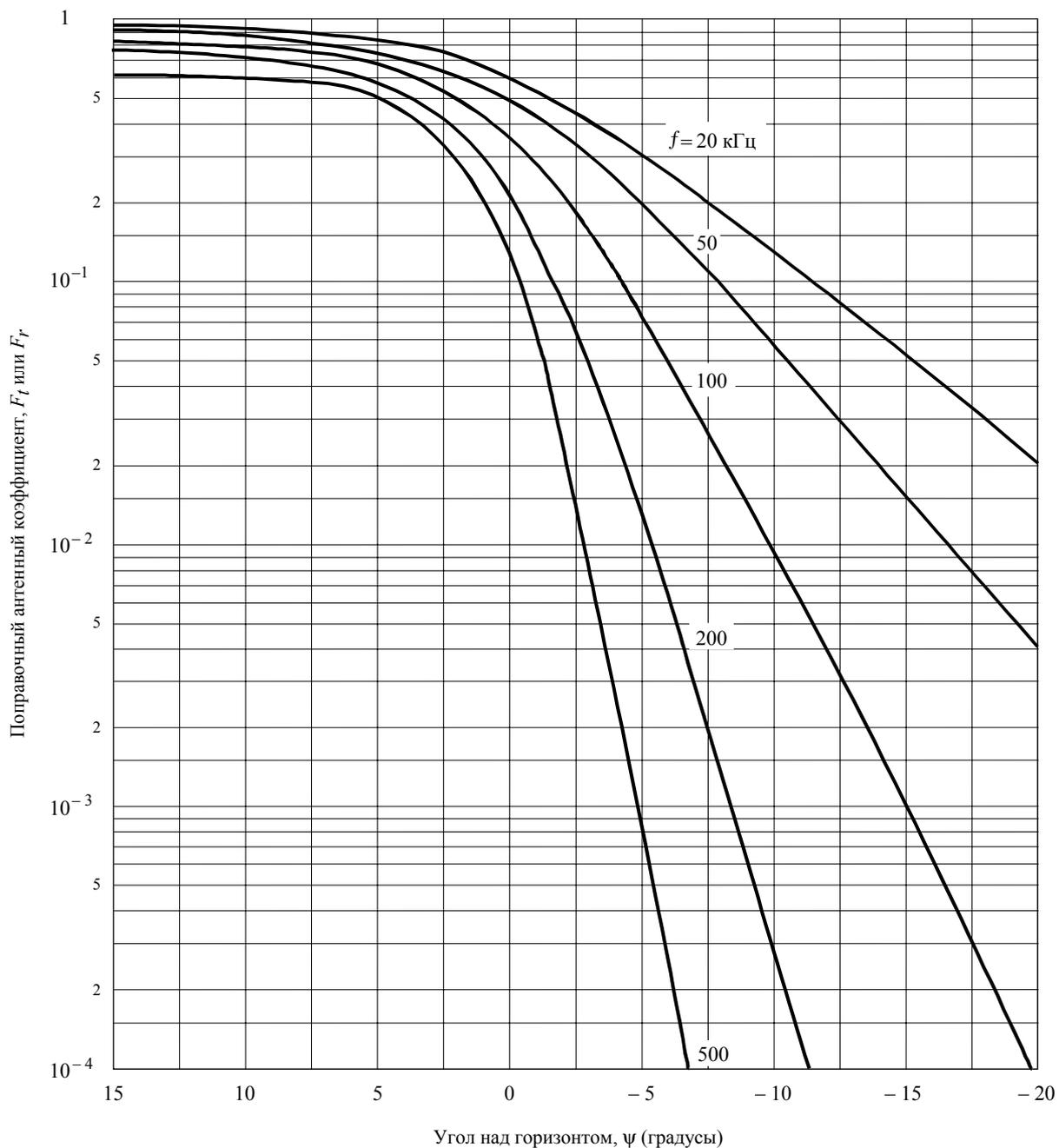


$$\begin{aligned} \epsilon &= 80 \epsilon_0 \\ \sigma &= 5 \text{ Сим/м} \\ \alpha &= 4/3 \times 6360 \text{ км} \end{aligned}$$

0684-07

РИСУНОК 8

## Поправочный антенный коэффициент – суша

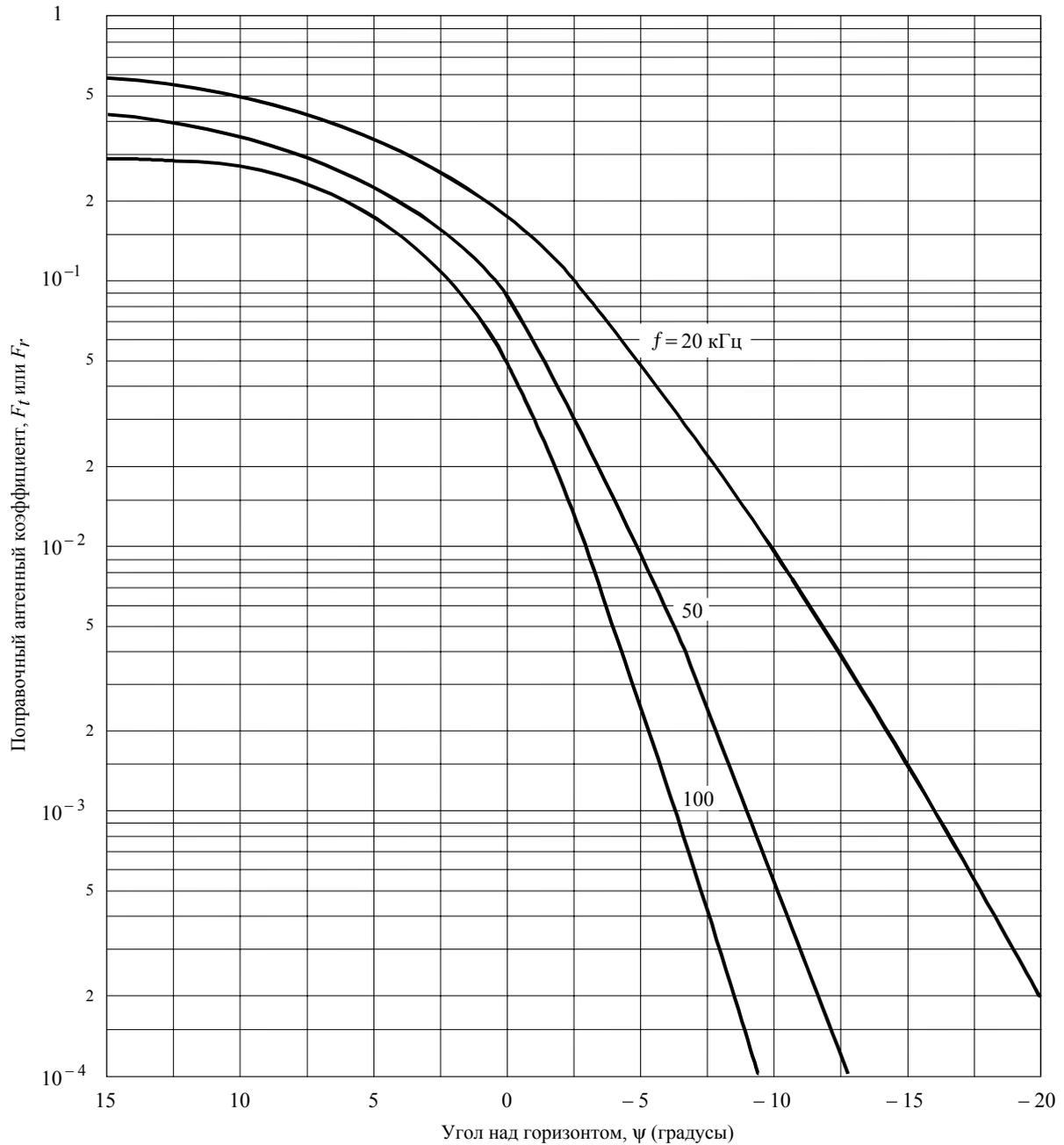


$$\begin{aligned} \varepsilon &= 15 \varepsilon_0 \\ \sigma &= 2 \times 10^{-3} \text{ Сим/м} \\ \alpha &= 4/3 \times 6360 \text{ км} \end{aligned}$$

0684-08

РИСУНОК 9

Поправочный антенный коэффициент – лед при температуре  $-4^{\circ}\text{C}$



$$\begin{aligned} \varepsilon &= 3 \varepsilon_0 \\ \sigma &= 0,025 \times 10^{-3} \text{ Сим/м} \\ \alpha &= 4/3 \times 6\,360 \text{ км} \end{aligned}$$

0684-09

ТАБЛИЦА 1

	Проводимость, $\sigma$ (См/м)	Диэлектрическая проницаемость, $\epsilon$
Морская вода	5	$80 \epsilon_0$
Суша	$2 \times 10^{-3}$	$15 \epsilon_0$
Полярный лед	$2,5 \times 10^{-5}$	$3 \epsilon_0$

$\epsilon_0$ : диэлектрическая проницаемость свободного пространства

Кривые были рассчитаны в предположении о том, что влияние атмосферной рефракции учитывается в эффективном радиусе Земли, 8480 км, равном 4/3 его фактического значения. Коэффициенты  $F$  – это отношение фактической напряженности поля к напряженности поля, которая наблюдалась бы в случае идеально проводящей Земли. Отрицательные значения  $\psi$  относятся к распространению за пределами границ применимости методов геометрической оптики для односкачковой пространственной волны (см. рисунки 1–3).

### 2.2.5 Коэффициенты отражения от ионосферы, $\parallel R_{\parallel}$

На рисунке 10 показаны значения коэффициентов отражения от ионосферы  $\parallel R_{\parallel}$  для минимума солнечного цикла. Для учета изменений частоты и расстояния значения  $\parallel R_{\parallel}$  даны в виде функции от  $f \cos i$ , где  $f$  – частота передаваемого сигнала, а  $i$  – угол падения на ионосферу. Для ночного времени суток представлены кривые для всех времен года, для дневного – только для зимы и лета. Указаны результаты измерений при вертикальном и наклонном падении, взятые из многочисленных отчетов.

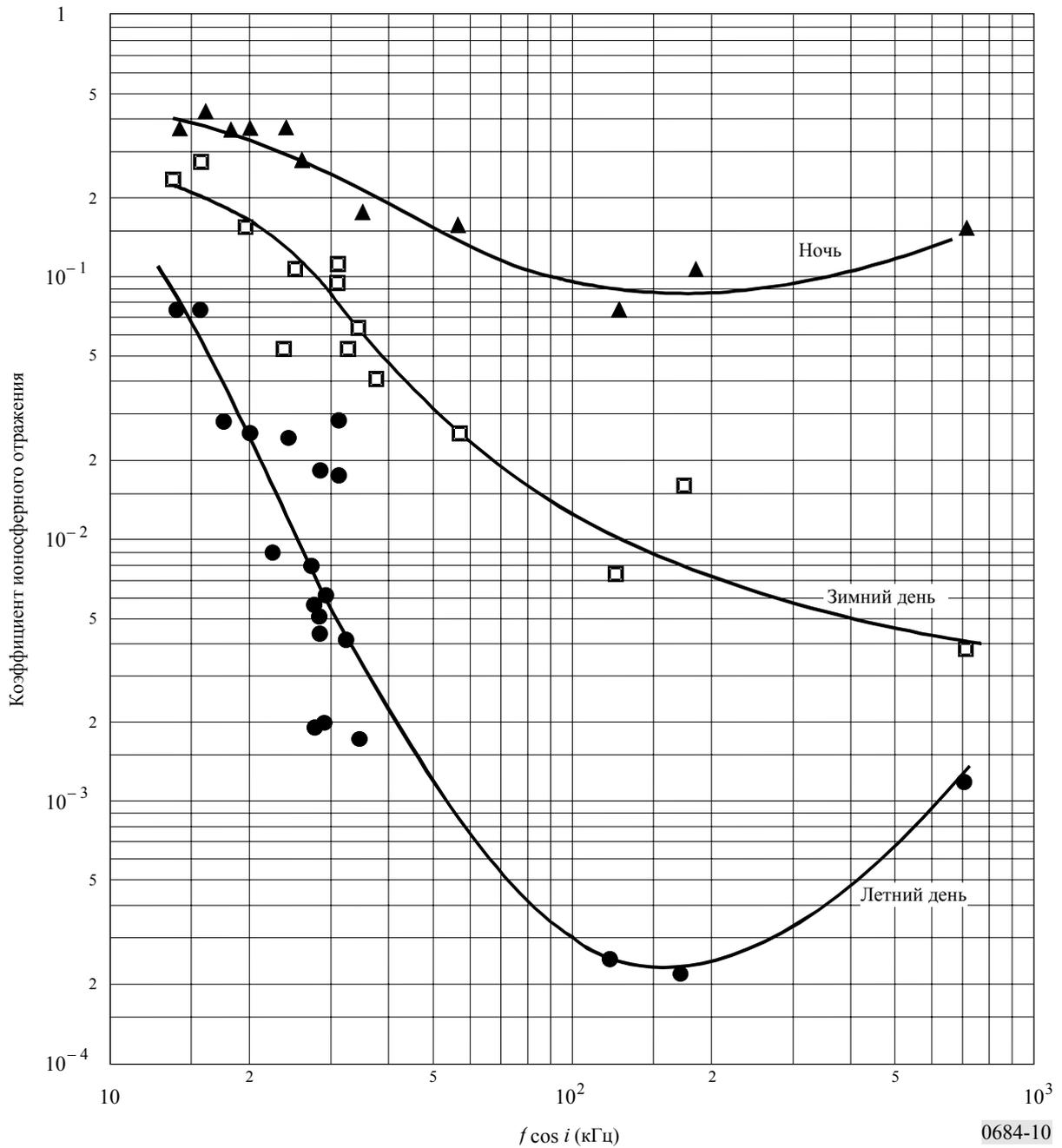
Во всех случаях данные о коэффициенте отражения от ионосферы, взятые из различных упоминавшихся источников, были при необходимости изменены для учета влияния ионосферной фокусировки, поправочных антенных коэффициентов и т. д., с тем чтобы результаты измерений соответствовали приведенной здесь методике анализа.

Однако не всегда можно полагаться на концепцию эффективной частоты  $f \cos i$ , для которой коэффициенты отражения постоянны. Кривые на рисунке 10 получены по данным при крутом падении ( $d < 200$  км) и более наклонном падении ( $d > 500$  км); концепция  $f \cos i$ , по всей вероятности, практически верна для таких расстояний. Однако на промежуточных расстояниях концепция эквивалентной частоты, вероятно, может привести к заметным погрешностям в коэффициентах отражения, поскольку при таких обстоятельствах коэффициент отражения и поляризация волны быстро меняются в зависимости от расстояния.

Хотя кривые на рисунке 10, основанные на многочисленных данных, дают представление об изменении коэффициента отражения в зависимости от времени суток (полночь и полдень) и времени года, необходимо еще много сделать, чтобы четко установить, как этот коэффициент меняется в зависимости от фазы солнечного цикла. Ясно, что существуют колебания, зависящие от солнечного цикла (см. рисунок 11), такие что в годы максимума солнечной активности коэффициенты отражения оказываются больше на очень низких частотах, тогда как на средних частотах они меньше. Физическое объяснение этого факта состоит в следующем. В годы максимума солнечной активности основание ионосферы расположено ниже, и градиент плотности электронов меняется более круто, чем в годы минимальной солнечной активности. Таким образом, отражение ОНЧ волн от этого нижнего слоя ионосферы происходит более интенсивно в годы максимальной солнечной активности, в то время как СЧ волны, которые отражаются выше этого нижнего слоя, более интенсивно поглощаются. Очевидно, можно ожидать, что переход между большими и меньшими коэффициентами отражения будет являться функцией частоты, времени суток, времени года и фазы солнечного цикла; можно также ожидать разрыва в кривой зависимости коэффициента отражения от частоты на некоторых отдельных частотах и в некоторые моменты времени. В данных, полученных летом в годы максимума солнечной активности, отчетливо видно резкое изменение значений для эффективных частот от 35 до 45 кГц, но это явление в представленных здесь данных не раскрыто.

РИСУНОК 10

Коэффициенты ионосферного отражения – условия минимума солнечной активности

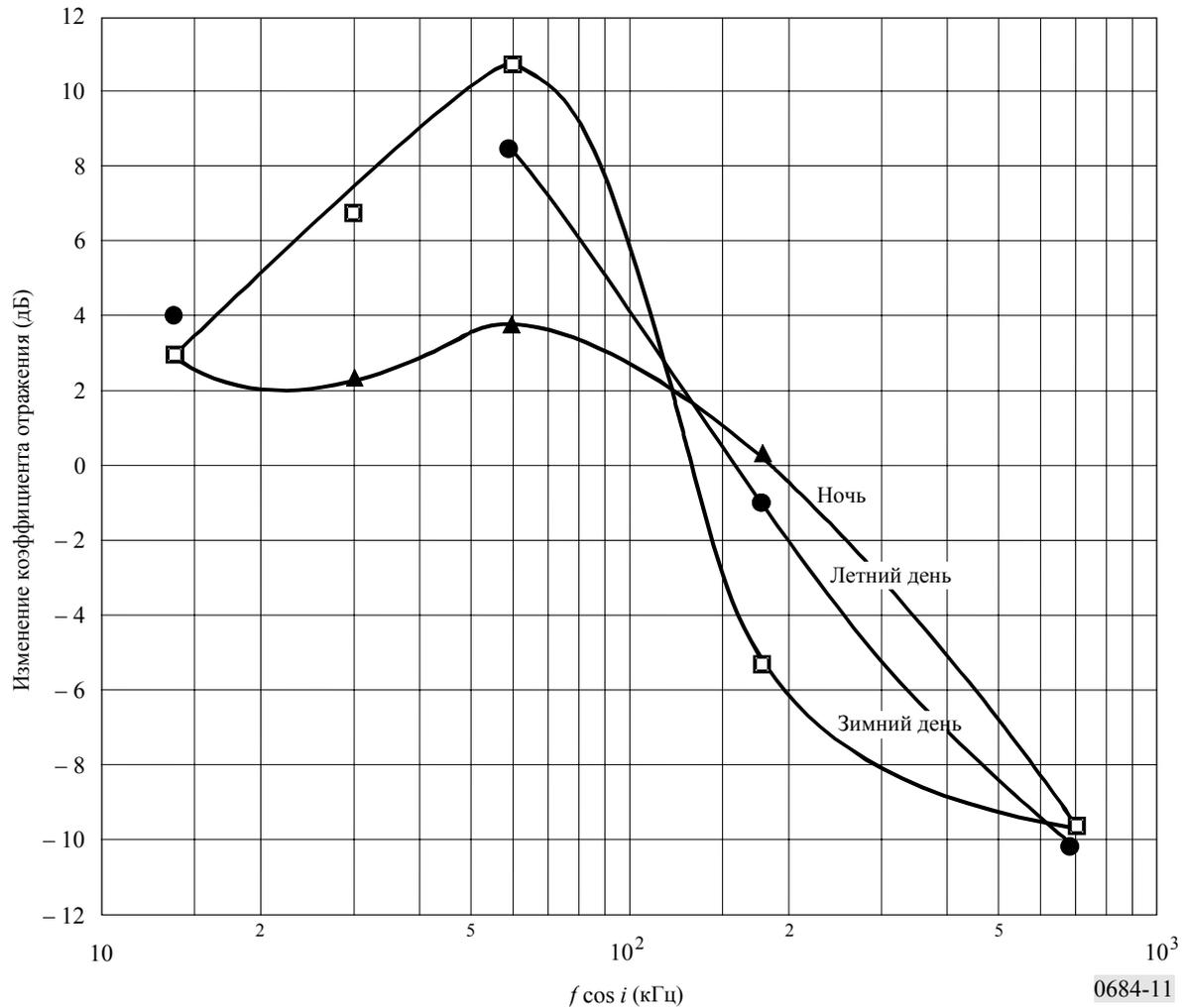


0684-10

Следует отметить, что при наклонном распространении диапазон СЧ радиовещания относится к диапазону эффективных частот с обратным изменением отражающих свойств ионосферы в течение солнечного цикла. То есть волна на частоте 1600 кГц, распространяющаяся на трассе длиной 1500 км, соответствует значению  $f \cos i$  порядка 278 кГц; в то время как для 500 кГц эффективная частота равняется 86 кГц. Пример расчета методом лучевых траекторий приводится в Приложении 1.

РИСУНОК 11

Изменение коэффициента отражения (дБ) от года минимума солнечной активности до года максимума солнечной активности в зависимости от эффективной частоты и времени



0684-11

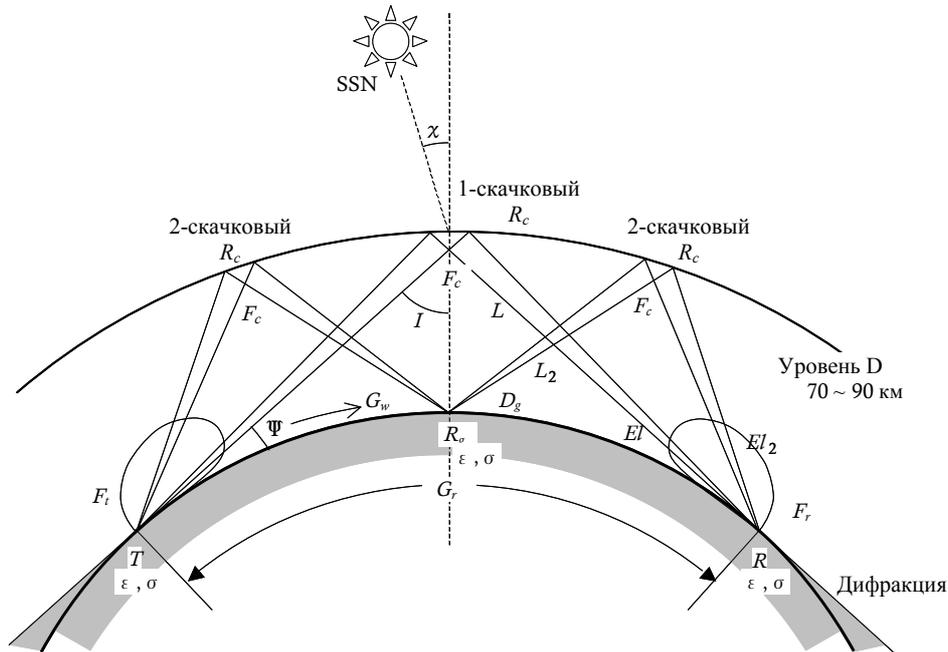
## 2.3 Численный метод для расчета результирующей напряженности поля и фазы

### 2.3.1 Геометрия трассы и подлежащие расчету коэффициенты распространения

Геометрия трассы и подлежащие расчету коэффициенты распространения показаны на рисунке 12.

РИСУНОК 12

## Коэффициенты распространения и геометрия трассы



0684-12

Горизонтальная дальность рассчитывается по следующему уравнению:

$$\cos(a) = \sin(lat_t)\sin(lat_r) + \cos(lat_t)\cos(lat_r)\cos(dif), \quad (6)$$

где:

- $a$ : центральный угол Земли;
- $lat_t$ : широта места расположения передатчика;
- $lat_r$ : широта места расположения приемника;
- $dif$ : разность между долготой места расположения передатчика ( $lon_t$ ) и долготой места расположения приемника ( $lon_r$ ).

Горизонтальная дальность  $g_r$  определяется как  $g_r = a \cdot 6360$  км.

Широта ( $lat_m$ ) и долгота ( $lon_m$ ) средней точки трассы определяются из следующих уравнений для заданного азимутального угла ( $azt2r$ ) траектории луча от передатчика к приемнику:

$$lat_m = \pi/2 - \arccos(\cos(a/2)\sin(lat_t) + \sin(a/2)\cos(lat_t)\cos(azt2r)) \quad (7)$$

$$lon_m = lon_t - \arccos((\cos(a/2) - \sin(lat_m)\sin(lat_t))/(\cos(lat_m)\cos(lat_t))), \quad (8)$$

где:

$$\cos(azt2r) = (\sin(lat_r) - \sin(lat_t)\cos(a))/(\cos(lat_t)\sin(a)) \quad (9)$$

Как одно-, так и двухскачковые моды рассчитываются для распространения на расстояния до 2000 км, с учетом потерь и изменений фазы при отражении от земли при вертикальной поляризации для двухскачковой моды. При распространении на расстояния до 4000 км расчет производится только для двухскачковой моды.

Косинус зенитного угла Солнца в точке ( $lat_m$ ,  $lon_m$ ) в заданный момент времени вычисляется следующим образом:

$$\cos \chi = \sin(lat_m) \sin(sol) + \cos(lat_m) \cos(sol) \cos(Sy - lon_m), \quad (10)$$

где:

- $\chi$ : зенитный угол Солнца;
- $lat_m$ : широта средней точки трассы;
- $lon_m$ : долгота средней точки трассы;
- $sol$ : наклонение солнца в средний день месяца;
- $Sy$ : долгота точки под Солнцем ( $= 180 - 15tg + lstm$ );
- $tg$ : местное время;
- $lstm$ : долгота меридиана местного поясного времени.

Угол места  $\Psi$  вычисляется согласно следующему уравнению:

$$\Psi = \arctan(\cot(d/(2R_e)) - R_e \operatorname{cosec}(d/(2R_e))/(R_e + h_r)), \quad (11)$$

где:

- $d$ : длина скачка;
- $R_e$ : эффективный радиус Земли (8500 км);
- $h_r$ : высота точки отражения.

Длина радиотрассы,  $P$  (км), вычисляется согласно следующему уравнению:

$$P = 2 R_e \sin(d/(2R_e)) \sec(\Psi + d/(2R_e)) \quad (12)$$

Угол падения,  $I$ , на ионосферу вычисляется согласно следующему уравнению:

$$I = \arcsin(R_e \cos(\Psi)/(R_e + h_r)) \quad (13)$$

Время задержки пространственной волны относительно земной волны вычисляется согласно следующему уравнению:

$$\text{Время задержки} = (P - d)/(3 \times 10^5) \quad \text{с} \quad (14)$$

### 2.3.2 Модель высоты точки отражения

Для расчета высоты точки отражения на протяжении суток вводятся параболические распределения слоя D/E, максимальная частота которого прогнозируется из величины foE в Рекомендации МСЭ-R P.1239. На рисунке 13 показаны  $h-f$  кривые слоя отражения в период от 0 (время 0–3 соответствует одной и той же кривой) до 12. При расчете основная частота параболы,  $f_b$ , минимальная полутолщина слоя,  $y_{min}$ , максимальная полутолщина слоя,  $y_{max}$ , и пиковая высота слоя E,  $h_{max}$ , даются в качестве значений по умолчанию, равных 10 кГц, 10 км, 30 км и 100 км, соответственно. Это означает, что высота точки отражения в ночное время составляет 90 км ( $h_{max} - y_{min}$ ), тогда как наименьшая высота точки отражения составляет 70 км ( $h_{max} - y_{max}$ ). Максимальная полутолщина,  $y_{max}$ , устанавливается в компьютерной программе в качестве переменной для применения к воздействию SID на распространение волн на НЧ.

Высота точки отражения,  $R_h$ , вычисляется следующим образом:

$$R_h = h_{max} - y_m \sqrt{1 - (f - f_b)/(foE)}, \quad (15)$$

где:

$$y_m = y_{tm} - (y_{tm} - y_{min})(f_{max} - foE)/(f_{max} - f_{min}) \quad (16)$$

и

$$y_{tm} = y_{max} - (y_{max} - y_{min})(fk_0 - f_{max})/(fk_0 - f_{min}) \quad (17)$$

Значения  $fk_0$  (foE при  $\cos \chi = 0$ ),  $f_{max}$  (максимум foE в конкретном месте) и foE (в заданное местное время) вычисляются из данных п. 4 "Прогноз величины foE" в Рекомендации МСЭ-R P.1239.

### 2.3.3 Коэффициент фокусировки

Коэффициент фокусировки, применимый для расчетов на протяжении суток, показан на рисунке 14 в качестве среднего значения кривых для дневного времени (рисунок 5) и ночного времени (рисунок 6).

РИСУНОК 13

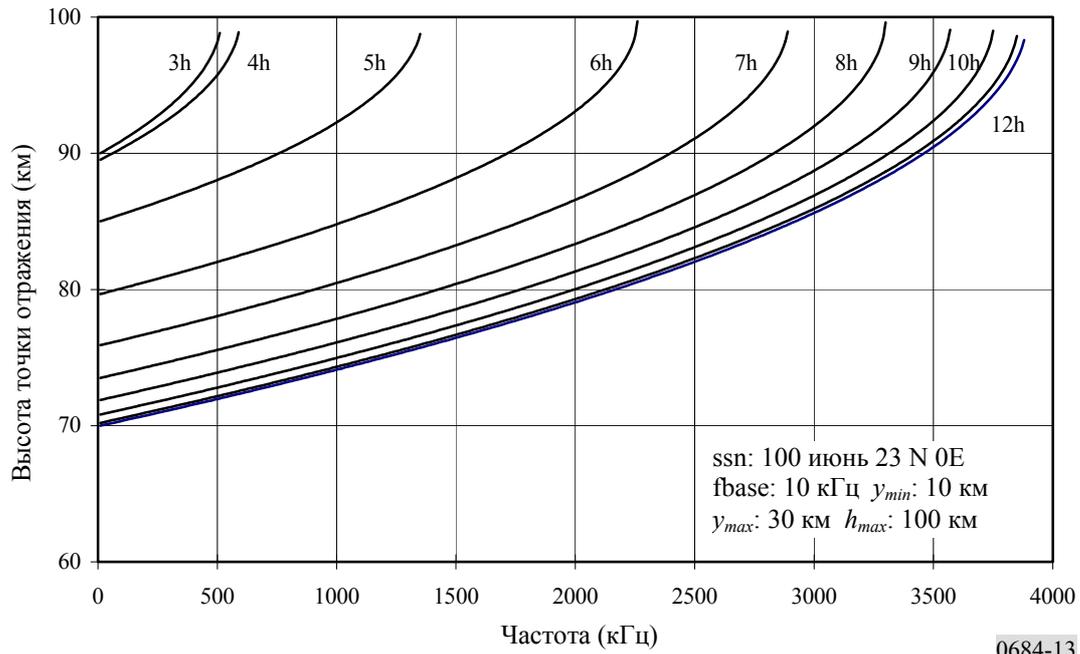
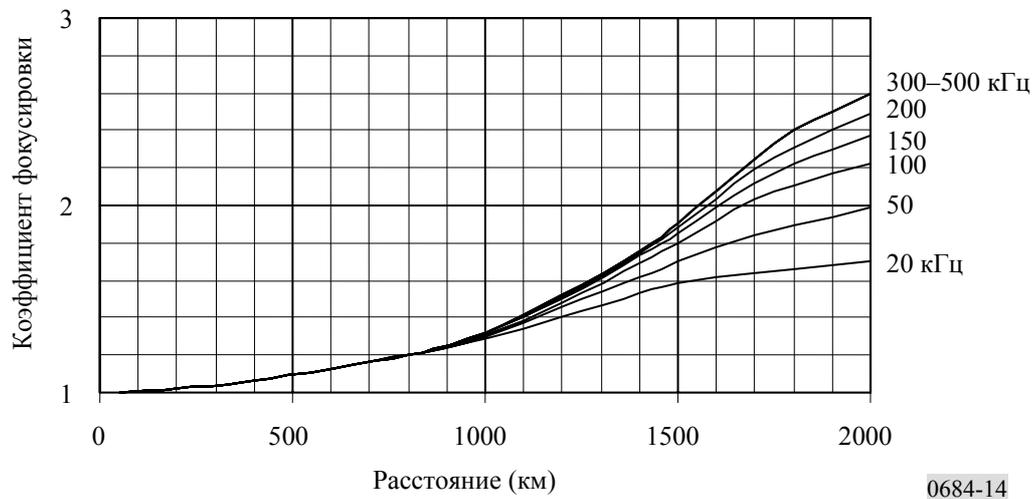
Кривые  $h-f$  отражающего слоя

РИСУНОК 14

## Коэффициент фокусировки



### 2.3.4 Поправочный коэффициент антенны

Поправочные коэффициенты передающей и приемной антенн вычисляются по кривым с интерполяцией по углу места и частоте для трех различных состояний земной поверхности, как указано ниже:

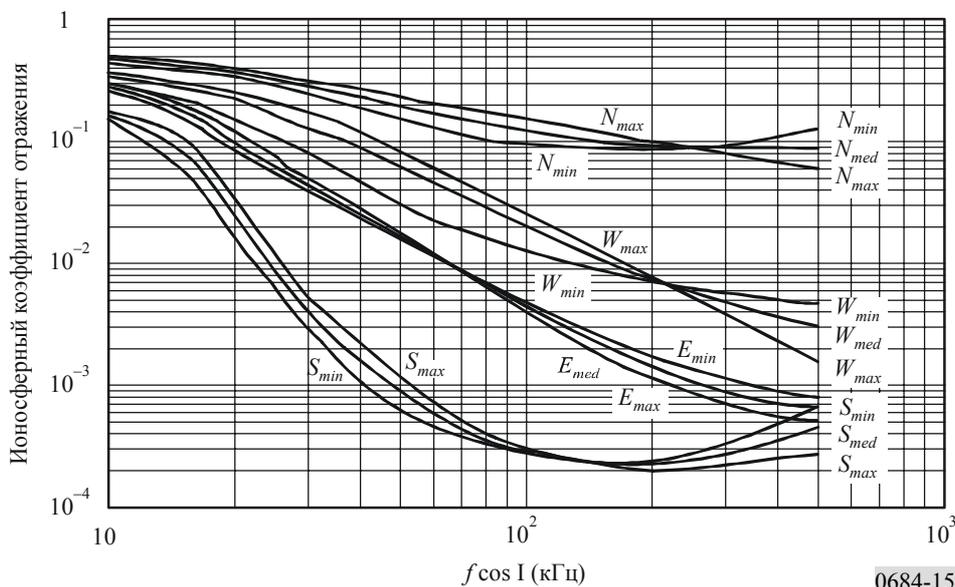
Состояние земной поверхности	Диэлектрическая постоянная ( $\epsilon$ )	Проводимость ( $\sigma$ в См/м)
Морская вода	80	5
Суша	15	0,002
Сухая почва	15	0,0005

### 2.3.5 Коэффициент ионосферного отражения

Коэффициенты ионосферного отражения, приведенные в п. 2.2, преобразуются в соответствующие коэффициенты для трех периодов солнечной активности при максимальном числе солнечных пятен ( $ssn: 75-150$ ), среднем их числе ( $ssn: 25-75$ ) и минимальном числе ( $ssn: 0-25$ ). Эти коэффициенты показаны в функции значения  $f\cos i$  для зимы, равноденствия и лета, как на рисунке 15. Затем значения косинуса зенитного угла солнца ( $\cos \chi$ ) в ночное время (N на рисунке) и в полдень зимой (W), в период равноденствия (E) и летом (S) в Канаде устанавливаются равными  $-0,21$ ,  $0,375$ ,  $0,707$  и  $0,93$ , соответственно. Коэффициенты ионосферного отражения в данных условиях получаются путем интерполяции  $R_c$  в отношении значений  $f\cos i$  и  $\cos \chi$ .

РИСУНОК 15

Ионосферный коэффициент отражения



0684-15

### 2.3.6 Потери на отражение от земли

Коэффициент отражения от земли,  $R_v$ , для вертикальной поляризации вычисляется как функция частоты,  $f$ , (кГц), угла места,  $\beta$ , диэлектрической постоянной,  $\epsilon$ , и проводимости почвы,  $\sigma$ .

$$R_v = (n^2 \sin(\beta) - (n^2 - (\cos(\beta))^2)^{1/2}) / (n^2 \sin(\beta) + (n^2 - (\cos(\beta))^2)^{1/2}), \quad (18)$$

где:

$$n^2 = \epsilon - j18\sigma 10^6 / f \quad (19)$$

Изменение фазового угла вертикально поляризованной волны в точке отражения вычисляется для заданной частоты, угла места и параметров почвы.

### 2.3.7 Напряженность поля пространственной волны

Если прием производится на небольшую рамочную антенну, расположенную на поверхности Земли, то эффективная напряженность поля пространственной волны,  $E_s$ , определяется следующим образом:

$$E_s = 600 \sqrt{Pt} \cos \Psi R_c F_c F_t F_r / L \quad \text{мВ/м}, \quad (20)$$

где:

- $Pt$ : излучаемая мощность (кВт);
- $\Psi$ : угол выхода и прихода пространственной волны у поверхности земли, относительно горизонтали;
- $R_c$ : коэффициент ионосферного отражения;
- $F_c$ : коэффициент ионосферной фокусировки;
- $F_t$  и  $F_r$ : поправочный коэффициент передающей и приемной антенны, соответственно;
- $L$ : длина трассы пространственной волны.

Для двухскачковой моды пространственной волны напряженность поля,  $E_{s2}$ , сигнала, принятого приемной рамочной антенной, представляется следующим образом:

$$E_{s2} = 600 \sqrt{Pt} \cos \Psi R_{c1} R_{c2} (F_c)^2 D_g R_g F_t F_r / L_2 \quad \text{мВ/м}, \quad (21)$$

где:

- $R_{c1}$  и  $R_{c2}$ : коэффициент ионосферного отражения для первого и второго отражения;
- $D_g$ : коэффициент дивергенции, вызванный сферичностью Земли, равный примерно  $F_c^{-1}$ ;
- $R_g$ : эффективный коэффициент отражения от Земли с конечным значением проводимости;
- $L_2$ : общая длина трассы распространения при двухскачковой траектории лучей.

Если  $R_{c1} = R_{c2} = R_c$  и  $D_g = 1/F_c$  в качестве приближения первого порядка,  $E_{s2}$  определяется следующим образом:

$$E_{s2} = 600 \sqrt{Pt} \cos \Psi R_c^2 F_c R_g F_t F_r / L_2 \quad \text{мВ/м} \quad (22)$$

### 2.3.8 Земная волна

Кривые распространения земных волн подбираются из Рекомендации МСЭ-R P.368 для трех состояний земной поверхности: морской воды ( $\epsilon:70$ ,  $\sigma:5$  См/м), суши ( $\epsilon:22$ ,  $\sigma:0,003$  См/м) и сухой почвы ( $\epsilon:7$ ,  $\sigma:0,0003$  См/м), и девяти частот 40, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 500 кГц. Затем напряженность поля земной волны вычисляется путем интерполяции как по расстоянию, так и по частоте.

### 2.3.9 Результирующая напряженность поля и фаза

Результирующая напряженность поля одно- и двухскачковых пространственных волн,  $R_s$ , вычисляется согласно следующему уравнению:

$$R_s^2 = E_{s1}^2 + E_{s2}^2 + 2 E_{s1} E_{s2} \cos \varphi, \quad (23)$$

где:

$$\varphi = 2\pi (\text{разность длин траекторий лучей между одно- и двухскачковыми пространственными волнами})/\lambda.$$

Напряженность поля,  $R$ , принимаемого сигнала, которая является результатом сложения пространственных волн и земной волны, вычисляется согласно следующему уравнению:

$$R^2 = R_s^2 + G^2 + 2R_s G \cos\theta, \quad (24)$$

где:

$\theta$ : угол фазовой задержки сигнала  $R_s$  относительно земной волны.

### 2.3.10 Изменения сигналов стандартных частот и сигналов времени на 40 кГц и 60 кГц в зависимости от расстояния

На рисунках 16 и 17 показаны прогнозируемые кривые распространения результирующих значений напряженности поля одно- и двухскачковых пространственных волн и земной волны на частоте 40 кГц в дневное и ночное время, соответственно, вместе с точечными данными, измеренными в феврале 2004 года.

РИСУНОК 16

Значения напряженности поля волны JJY на частоте 40 кГц,  
принятой в дневное время в феврале 2004 года

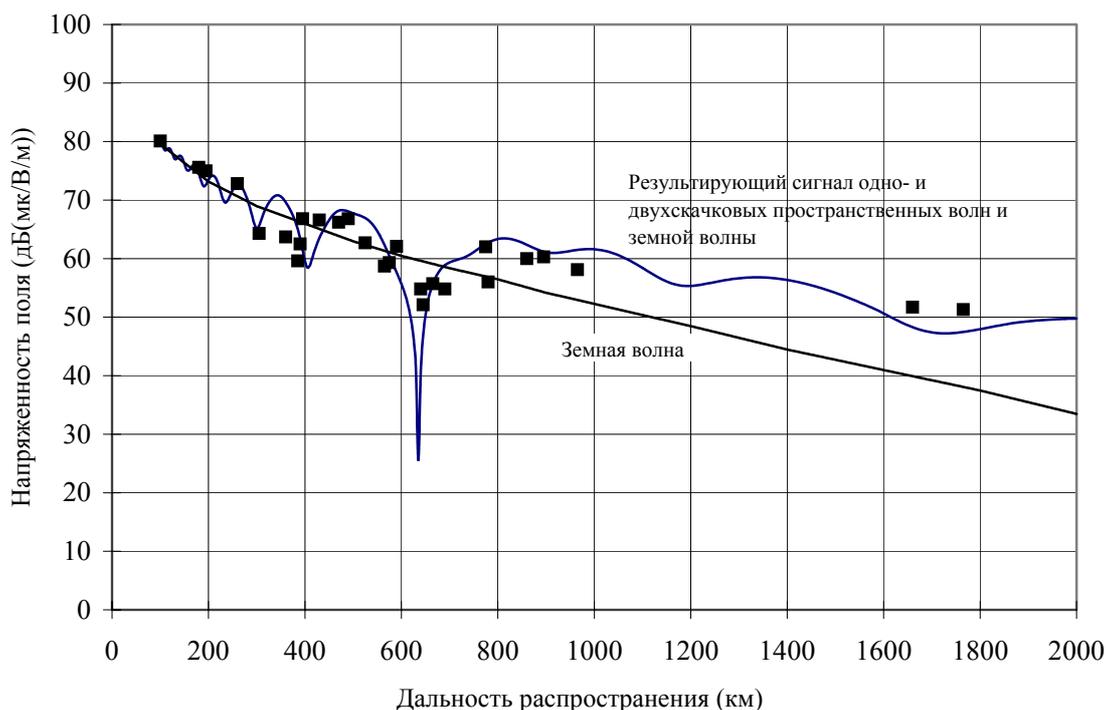
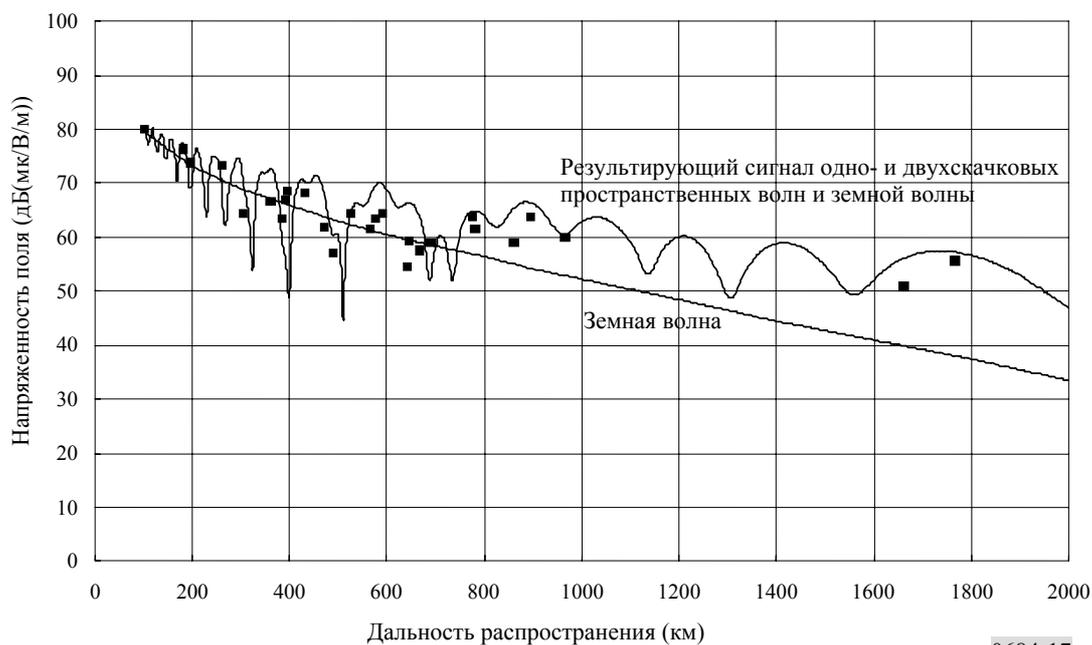


РИСУНОК 17  
Значения напряженности поля волны JJY на частоте 40 кГц,  
принятой в ночное время в феврале 2004 года



На рисунках 18 и 19 показаны прогнозируемые кривые распространения результирующих значений напряженности поля одно- и двухскачковых пространственных волн и земной волны на частоте 60 кГц в дневное и ночное время, соответственно, вместе с точечными данными, измеренными в феврале 2004 года.

РИСУНОК 18  
Значения напряженности поля волны JJY на частоте 60 кГц,  
принятой в дневное время в феврале 2004 года

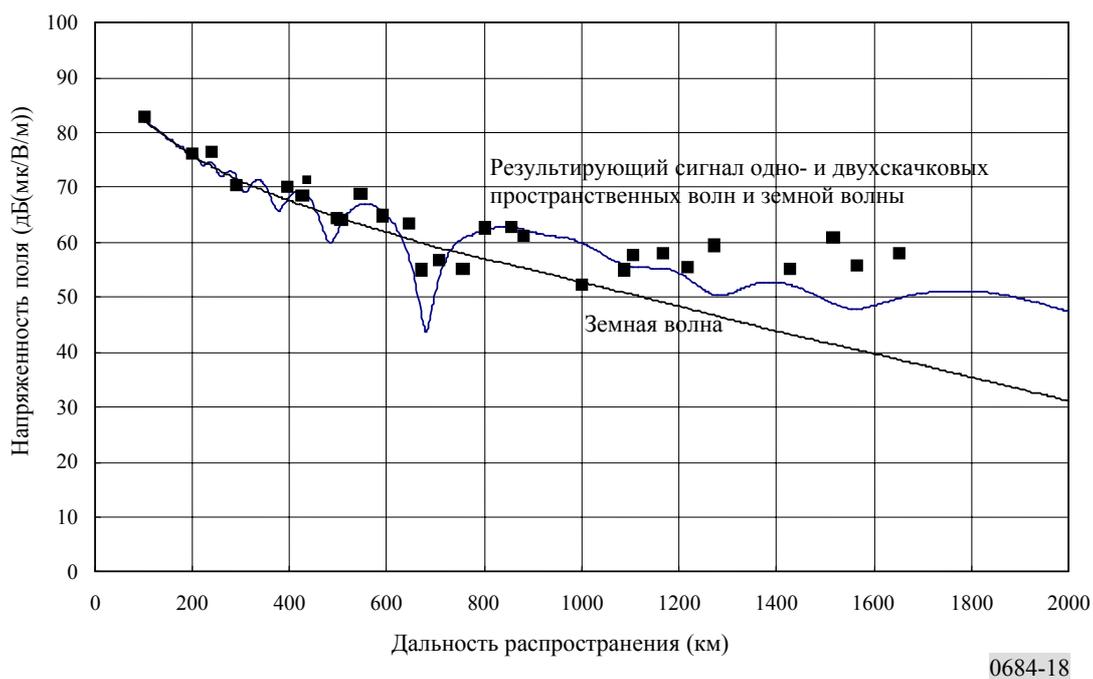
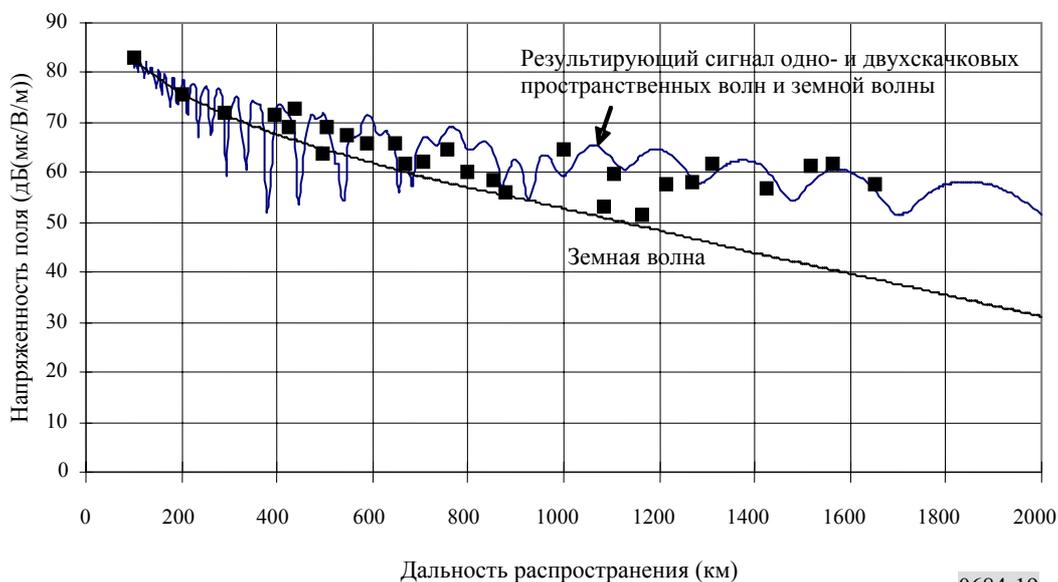


РИСУНОК 19

Значения напряженности поля волны JJY на частоте 60 кГц,  
принятой в ночное время в феврале 2004 года



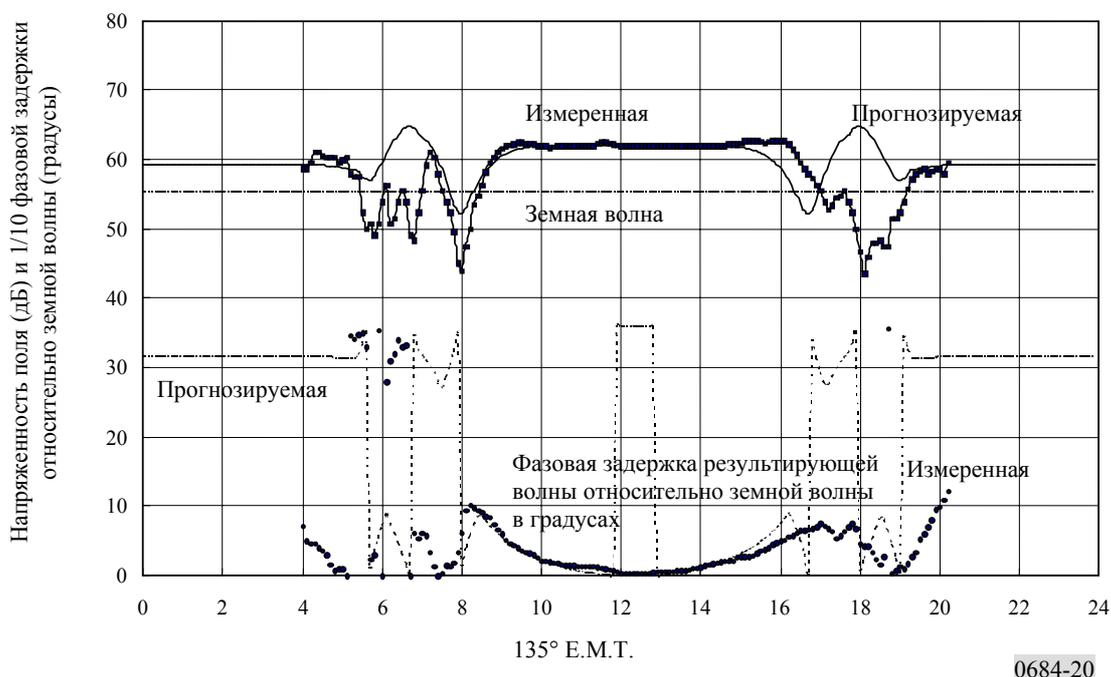
Между прогнозируемыми кривыми и измеренными значениями наблюдается хорошее соответствие, причем имеют место явно выраженные провалы на расстоянии примерно 600–700 км, за которыми следует увеличенный примерно на 10 дБ уровень напряженности поля.

### 2.3.11 Временные изменения напряженности поля и фазы сигналов стандартной частоты и сигналов времени на 60 кГц

Фазовая задержка принятого сигнала соответствует фазовой задержке результирующих значений пространственных волн и земной волны относительно земной волны. Эта задержка и напряженность поля, записанные 28 февраля 2004 года, нанесены на график с указанием местного времени, как показано на рисунке 20, вместе с суточным изменением прогнозируемой напряженности поля и фазовой задержки. Очевидно, что данный метод прогнозирования полезен для оценки стабильности сигналов стандартных частот и сигналов времени.

РИСУНОК 20

Суточные изменения напряженности поля и фазы волны JJY на частоте 60 кГц, принятой в пункте Коганей 28 февраля 2004 года



0684-20

### 3 Расчет напряженности поля с помощью волноводных мод: полное волновое решение

При распространении КНЧ, ОНЧ и НЧ наземных радиоволн на большие расстояния волны удерживаются в пространстве между Землей и ионосферой. Это пространство действует как волновод, а "концепция волновода" используется для описания распространяющихся полей в виде функции от расстояния.

Метод волноводных мод позволяет получить полное волновое решение для волновода, имеющего следующие характеристики:

- концентрация электронов и ионов, а также частота столкновений (по высоте) распределены произвольным образом, и
- нижняя граница, которой является гладкая однородная земная поверхность, характеризуется переменными значениями проводимости и диэлектрических постоянных. В этом методе учтены также кривизна Земли, неоднородность ионосферы и анизотропия (являющаяся результатом воздействия магнитного поля Земли).

Считается, что энергия внутри волновода распределена между отдельными модами. Для каждой моды выполняется условие резонанса, то есть для дискретного набора углов падения радиоволн на ионосферу происходит резонанс, и энергия распространяется от источника. Комплексные углы ( $\theta$ ), для которых это происходит, называются собственными углами (или "модами"). Их можно получить, используя "полные волновые" процедуры, описанные в пп. 3.1 и 3.2, путем решения детерминантного уравнения (то есть уравнения мод):

$$F(\theta) = \left| R_d(\theta) \bar{R}_d(\theta) - 1 \right| = 0, \quad (25)$$

где:

$$R_d(\theta) = \begin{bmatrix} \parallel R_{\parallel d}(\theta) & \perp R_{\parallel d}(\theta) \\ \parallel R_{\perp d}(\theta) & \perp R_{\perp d}(\theta) \end{bmatrix} \quad (26)$$

представляет собой матрицу комплексного коэффициента ионосферного отражения, если смотреть на ионосферу вверх с высоты "d", и:

$$\bar{R}_d(\theta) = \begin{bmatrix} \parallel \bar{R}_{\parallel d}(\theta) & 0 \\ 0 & \perp \bar{R}_{\perp d}(\theta) \end{bmatrix} \quad (27)$$

представляет собой матрицу комплексного коэффициента отражения, если смотреть с высоты "d" вниз на Землю.

Знак  $\parallel$  при  $R$  и  $\bar{R}$  обозначает вертикальную поляризацию, а  $\perp$  – горизонтальную. Первый нижний индекс при  $R$  относится к поляризации падающей волны, а второй – к поляризации отраженной волны.

Отдельные члены в уравнениях (26) и (27) представляют собой:

- $\parallel R_{\parallel}$ : отношение отраженного поля в плоскости падения к падающему полю в той же плоскости;
- $\perp R_{\perp}$ : отношение отраженного поля, перпендикулярного плоскости падения, к падающему полю, перпендикулярному плоскости падения;
- $\parallel R_{\perp}$ : отношение отраженного поля, перпендикулярного плоскости падения, к падающему полю в плоскости падения;
- $\perp R_{\parallel}$ : отношение отраженного поля в плоскости падения к падающему полю, перпендикулярному плоскости падения.

Матрица ионосферного отражения,  $R_d$  (уравнение (26)) на высоте  $d$  получается путем численного интегрирования дифференциальных уравнений, приведенных Бадденом ("The waveguide theory of wave propagation", Logos Press, London, 1961). Дифференциальные уравнения интегрируются методом Рунге-Кутты, начиная с некоторой высоты, выше которой предполагается, что отражение пренебрежимо мало. За начальное условие интегрирования, то есть за исходную величину  $R$ , принимается значение  $R$  для резко ограниченной ионосферы в области максимума заданных профилей электронной концентрации и частоты столкновений. Член  $R_d$  вычисляется с помощью решений уравнения Стокса и их производных.

Модальное уравнение, то есть уравнение (25), решается для желаемого количества мод (собственных углов,  $\theta_n$ ). Для набора полученных таким образом значений  $\theta$  можно рассчитать параметры распространения: скорость затухания, фазовую скорость, а также амплитуду и фазу коэффициента возбуждения. Эти параметры затем используются при суммировании мод для вычисления общего поля, амплитуды и фазы в некоторой удаленной точке.

Во многих случаях можно считать, что волновод Земля–ионосфера имеет постоянные параметры распространения вдоль трассы передачи. Вычисленные суммарные моды в этих случаях рассматриваются как горизонтально однородные. Однако для распространения на большие расстояния предположение о постоянстве параметров волновода вдоль всей трассы становится нереальным. Например, направление и напряженность магнитного поля Земли будут меняться, и на нижней стенке волновода могут возникать неоднородности из-за изменения проводимости земной поверхности, связанного с различными границами вода–суша и ледяных полярных шапок. Проводимость ионосферы также меняется в зависимости от времени суток, времени года и наличия линии восхода и захода солнца на трассе распространения.

Указанные виды неоднородностей таковы, что вызывают дискретные изменения состояния волновода. В этих случаях необходимо принимать во внимание эффекты преобразования мод в области неоднородностей. Преобразование мод предполагает, что одна распространяющаяся

мода в одной области волновода может образовать две или более моды в другой части волновода, и эти новые моды будут распространяться по направлению к приемнику.

### 3.1 Матрица коэффициента ионосферного отражения, $R(\theta)$

Критическим моментом при определении модовых констант, обсуждавшихся в предыдущем разделе, является оценка матрицы коэффициента отражения,  $R$ , для вертикально неоднородной анизотропной ионосферы. Эту оценку получают путем численного интегрирования дифференциальных уравнений, предложенных Бадденом.

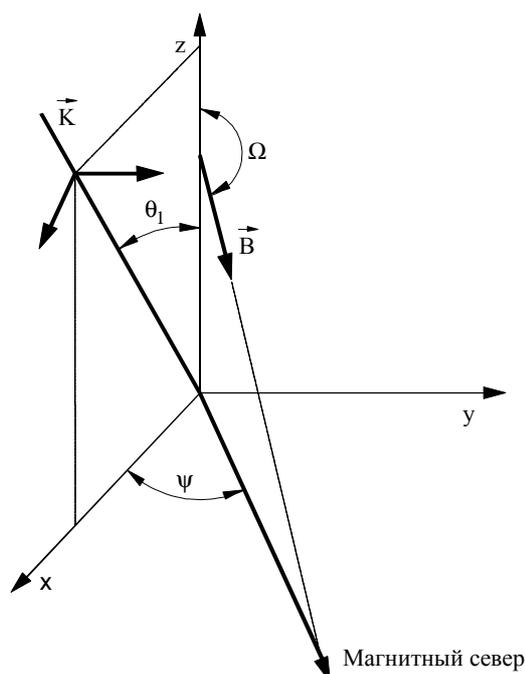
Выбираемая система координат такова, что направление  $z$  считается положительным в сторону ионосферы. Положительное значение  $x$  совпадает с направлением распространения, а ось  $y$  перпендикулярна к плоскости распространения.

Соответствующая геометрия приведена на рисунке 21, где показана плоская волна, падающая на ионосферу снизу, с волновым вектором  $\vec{K}$  в плоскости  $x$ - $z$  (плоскость падения) под углом  $\theta_1$  к вертикали (ось  $z$ ). Другими переменными, приведенными на рисунке, являются  $\Omega$  – угол геомагнитного поля, измеренный от вертикали ( $90^\circ < \Omega \leq 180^\circ$  для Северного полушария), и  $\psi$  – азимут распространения (к востоку от магнитного севера). Вектор  $\vec{B}$  представляет собой плотность потока магнитного поля Земли.

Дифференциальные уравнения интегрируются методом Рунге-Кутты, начиная с некоторой высоты, выше которой предполагается, что отражение пренебрежимо мало. За начальную величину  $R$  принимается значение  $R$  для резко ограниченной ионосферы, характеризуемой параметрами в области максимума заданных профилей концентрации электронов, ионов и частоты столкновений. Контроль погрешности при интегрировании методом Рунге-Кутты ведется с помощью сравнения на каждом шаге приращений элементов  $R$ , вычисленных методом Рунге-Кутты четвертого порядка, и тех, которые вычислены на шаге интегрирования второго порядка. Интегрирование ведется от некоторой начальной высоты вниз до высоты  $d$ , где  $d$  определяется из уравнения (25). Необходимо только, чтобы  $d$  была выбрана достаточно низко в ионосфере, чтобы влияние ионосферы было мало по сравнению с влиянием кривизны Земли. Ниже уровня  $d$  учитывается только влияние кривизны Земли путем введения модифицированной диэлектрической проницаемости, которая меняется линейно с высотой.

РИСУНОК 21

Геометрия распространения волны



### 3.2 Матрица коэффициента отражения от земли, $\bar{R}_d(\theta)$

Матрица коэффициента отражения от земли,  $\bar{R}_d$ , приведенная в уравнении (27), определяется через независимые решения  $h_1$  и  $h_2$  уравнения Стокса

$$\frac{d^2 h_{1,2}}{dz^2} + zh_{1,2} = 0, \quad (28)$$

где функции  $h_1$  и  $h_2$  представляют собой модифицированные функции Ганкеля порядка 1/3 (которые линейно связаны с функциями Эйри).

### 3.3 Метод определения мод ("MODESRCH")

В волноводной теории считается, что поле состоит из одного или более дискретных семейств (мод) плоских волн, заключенных в волновод Земля–ионосфера. Основная цель заключается в том, чтобы найти решение уравнения (25) для собственных углов  $\theta_n$ . Для этого используется метод, известный под названием "MODESRCH".

Метод "MODESRCH", разработанный в основном для ОНЧ и нижней части НЧ (от 10 кГц до приблизительно 60 кГц), распространяющихся в волноводе Земля–ионосфера, позволяет определить все моды в любой физически важной прямоугольной области комплексного пространства собственных углов ( $\theta_n$ ). С его помощью можно также определить единственную моду, необходимую для распространения КНЧ. Процедура основана на теории функций комплексной переменной. Модальное уравнение (25) решается для всех важных собственных углов,  $\theta_n$ , для данного набора параметров волновода Земля–ионосфера и частоты распространения. Поиск собственных углов основан на том, что линии постоянной фазы для любой комплексной функции  $F(\theta)$  могут быть разрывны только в точках, где  $F(\theta) = 0$  или  $F(\theta) \rightarrow \infty$ . Для упрощения процедуры поиска значений  $\theta_n$  функция  $F(\theta)$  преобразуется таким образом, чтобы она не содержала полюсов и можно было рассматривать только случай  $F(\theta) = 0$ . Решение уравнения  $F(\theta) = 0$  обозначается как  $\theta_0$ , то есть  $\theta_0$  – это нуль уравнения  $F(\theta) = 0$ .

Пусть:

$$F(\theta) = F_R(\theta_r, \theta_i) + j F_I(\theta_r, \theta_i) = \text{Re}(F) + j \text{Im}(F), \quad (29)$$

где:

$$\theta = \theta_r + j \theta_i \quad (30)$$

Также:

$$F(\theta) = \left[ (F_R(\theta_r, \theta_i))^2 + (F_I(\theta_r, \theta_i))^2 \right]^{1/2} e^{j\varphi}, \quad (31)$$

где:

$$\varphi = \text{tg}^{-1} \left[ \frac{F_I(\theta_r, \theta_i)}{F_R(\theta_r, \theta_i)} \right] \quad (32)$$

и:

$F_R(\theta)$ : реальная часть комплексной функции  $F(\theta)$ ;

$F_I(\theta)$ : мнимая часть комплексной функции  $F(\theta)$ ;

$\theta_r$ : реальная часть комплексного угла  $\theta$ ;

$\theta_i$ : мнимая часть комплексного угла  $\theta$ .

Из уравнения (32) следует, что если:

$\varphi = 0^\circ$  (или  $180^\circ$ ), то это означает, что

$$F_I(\theta_r, \theta_i) = 0$$

Также если:

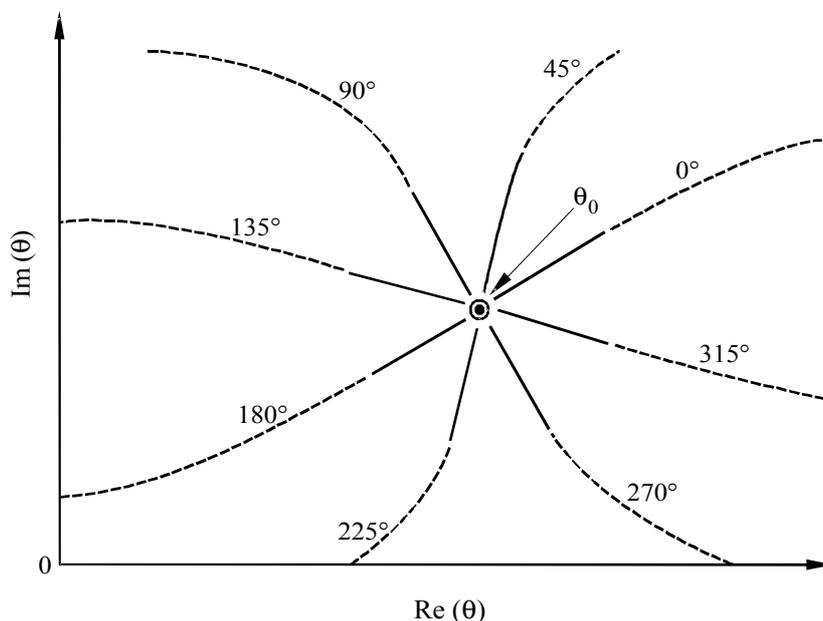
$\varphi = 90^\circ$  (или  $270^\circ$ ), то это означает, что

$$F_R(\theta_r, \theta_i) = 0$$

Это ведет к фазовой диаграмме, представленной на рисунке 22. Семейство линий постоянной фазы, которые называются фазовыми контурами в диапазоне от 0 до  $2\pi$  радиан, выходят по радиусу (сплошные линии) из простого нуля. Пунктирные линии отражают поведение возможных фазовых контуров в области за пределами окрестности  $\theta_0$  и указывают на то, что в этой области фазовые контуры обычно не являются радиальными. С учетом поведения фазы в районе нуля функции  $F(\theta)$  концептуально полезно определить этот нуль функции  $F(\theta)$  как набор фазовых контуров.

Некоторые основные положения процедуры определения нулей функции  $F(\theta)$  приведены на рисунке 23. Прямоугольник поиска расположен примерно в этой же области комплексной плоскости. Прямоугольник поиска разделен на сетку, состоящую из квадратных ячеек, углы которых мы будем называть точками ячеек. Размер квадратной ячейки оптимален и обычно выбирается в соответствии с ожидаемым расположением нулей. Если функция  $F(\theta)$  не имеет полюсов, то это означает, что линия постоянной фазы любой конкретной величины  $\varphi = \varphi_c$ , выходящая из нуля функции  $F(\theta)$ , должна пересекать замкнутый контур, содержащий этот нуль, по крайней мере один раз. Кроме того, на этой фазовой линии не может быть других нулей функции  $F(\theta)$ . Также линии постоянной фазы вокруг  $F(\theta) = 0$  создаются только в направлении против часовой стрелки. Линию постоянной фазы (например,  $\varphi = \varphi_c$ ), которая пересекает контур, можно проследить внутрь, пока она не приведет к нулю функции  $F(\theta)$  или вновь не пересечет контур. Начиная с верхнего левого угла прямоугольника поиска проводится поиск границ для фазовых контуров  $0^\circ$  и  $180^\circ$  в направлении против часовой стрелки. Подойдет любой фазовый контур; вместе с тем фазовые контуры  $0^\circ$  и  $180^\circ$  выбираются потому, что математически их легко обнаружить при  $\text{Im}(F) = 0$ . Поиск осуществляется путем оценки  $F(\theta)$  в углах ячейки по границе прямоугольника поиска. Когда  $\text{Im}(F)$  меняет знак, это означает, что пересечен фазовый контур  $0^\circ$  или  $180^\circ$  (точки A, D и G). Как только найден один из этих фазовых контуров, поиск границ временно прекращается, пока не будет прослежен фазовый контур  $0^\circ$  или  $180^\circ$  внутри прямоугольника поиска путем оценки  $\text{Im} F(\theta)$  в углах квадратов ячеек (проверка производится против часовой стрелки начиная с верхнего левого угла каждой ячейки). Фазовый контур прослеживается до тех пор, пока либо не обнаружен нуль функции  $F(\theta)$  (точки B и E), либо не достигнута граница прямоугольника поиска (как было бы в случае фазового контура, расположенного между точками G и H). Одно из этих событий обязательно произойдет, если внутри прямоугольника поиска нет полюсов. Когда нуль найден, его положение запоминается. Затем фазовый контур прослеживается до противоположной стороны нуля, при этом фаза меняется на  $180^\circ$  (см. рисунок 22), пока вновь не достигается граница прямоугольника поиска (точки C и F). Если фазовый контур существует, граница поиска, такая как точка C, F или H, и квадрат ячейки, которая их содержит, помечаются, с тем чтобы избежать повторного прохождения данного фазового контура при последующем поиске границы. Также в такой точке (точка C, F или H) поиск фазового контура прекращается и возобновляется поиск границ в точке, где последний раз встречалась фазовая линия  $0^\circ$  или  $180^\circ$  (например, точки A, D или G). Когда все границы прямоугольника поиска исследованы, все нули функции  $F(\theta)$ , расположенные внутри него, должны быть найдены.

РИСУНОК 22

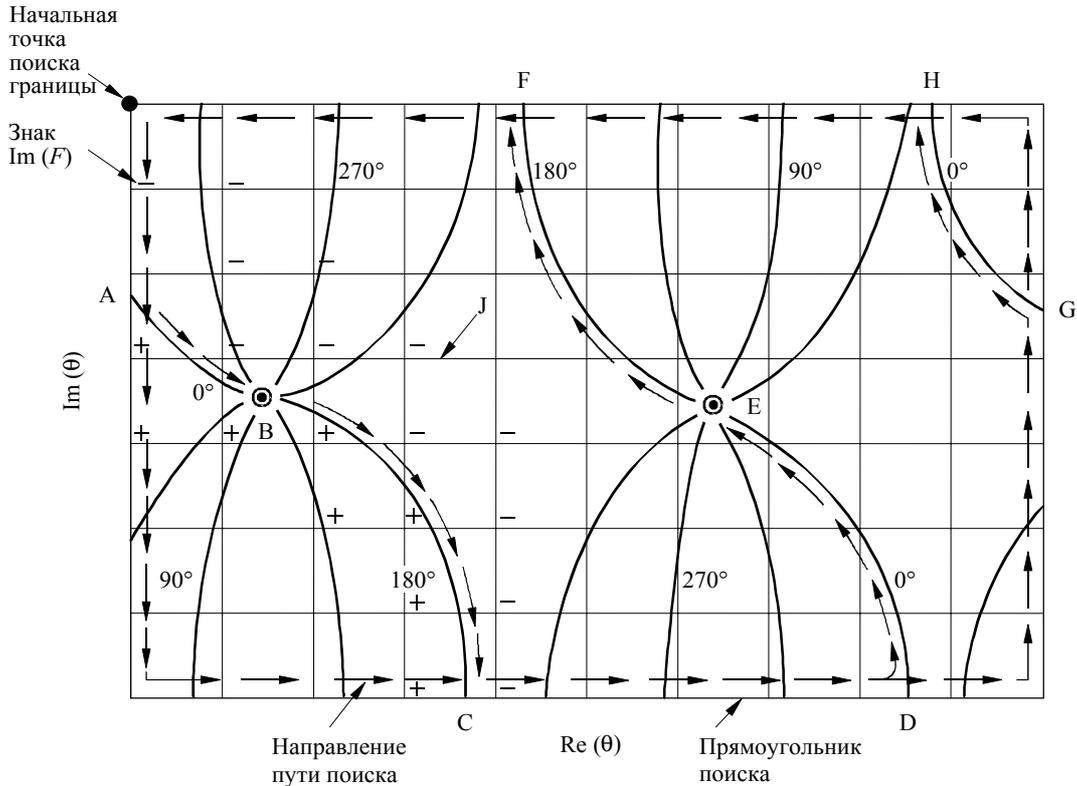
Поведение фазового контура в окрестности нуля функции  $F(\theta)$ 

- Фазовый контур в окрестности  $\theta_0$   
 - - - - - Фазовый контур вне окрестности  $\theta_0$

0684-22

Положение нуля хорошо видно из пересечения фазовых контуров (см. рисунок 22). Следовательно, пересечение фазовых контуров  $0^\circ$  или  $180^\circ$  с любым другим фазовым контуром определяет положение нуля функции  $F(\theta)$ . Другие фазовые контуры, используемые для этой цели, – это контур  $90^\circ$  или  $270^\circ$ , также выбранный из соображений простоты, поскольку эти контуры легко распознаются и соответствуют  $\text{Re}(F) = 0$ . Пока прослеживается фазовый контур  $0^\circ$  или  $180^\circ$ , ведется и исследование  $\text{Re}(F)$  на углах каждой ячейки сетки, с тем чтобы определить момент смены знака  $\text{Re}(F)$ , который указывает на то, что фазовый контур  $90^\circ$  или  $270^\circ$  вошел в ячейку сетки. Это событие указывает на тот факт, что нуль вероятно находится внутри ячейки сетки или, что тоже возможно, внутри соседней ячейки. Как только становится ясно, что та или иная ячейка содержит нуль, переходят к более точному определению положения нуля с помощью интерполяционной схемы, которая использует как амплитуду, так и фазу функции  $F(\theta)$ . Положение нуля при этом точно определяется с помощью метода итерации Ньютона-Рафсона.

РИСУНОК 23

Метод определения моды для функции  $F(\theta)$ 

———— Фазовые контуры для  $F(\theta)$

⊙ Нули функции  $F(\theta)$

J Ячейка сетки

0684-23

В процедуре Ньютона-Рафсона в качестве начального решения  $\theta_0$  уравнения (25), где  $F(\theta) = 0$ , используется каждое значение собственного угла,  $\theta_n$ , полученное из сетки "MODESRCH". Затем находится новое значение функции для  $\theta_0 + \delta\theta$ , а поправка для  $\theta_0$  определяется с помощью уравнения:

$$\Delta\theta = \frac{F(\theta_0) \delta\theta}{F(\theta_0 + \delta\theta) - F(\theta_0)} \quad (33)$$

Затем поправка, определенная с помощью уравнения (33), оценивается, и процесс повторяется до тех пор, пока величины  $|\Delta\theta_r|$  и  $|\Delta\theta_i|$  не уменьшатся до заранее заданных допустимых значений. Нижние индексы  $r$  и  $i$  обозначают действительную и мнимую части, соответственно.

## 4 Расчет напряженности поля

### 4.1 Необходимые параметры

Когда известны собственные углы,  $\theta_n$ , легко рассчитать следующие величины, представляющие физический интерес.

$$\text{Фазовая скорость на земле } V = \frac{c}{K(\sin \theta_n)_r} \quad (34)$$

$$\text{Постоянная затухания на уровне земли (дБ/Мм): } \Gamma = -8,6859 k K(\sin \theta_n)_i, \quad (35)$$

где:

$$\text{Скорость света в вакууме: } c = 2,997928 \times 10^5 \text{ км/с}$$

$$K = \left(1 + \frac{\alpha h}{2}\right) \quad (36)$$

$$\alpha = 2/a = 3,14 \times 10^{-4} / \text{км} \quad (37)$$

В соответствии с геометрией, представленной на рисунке 21, направление стратификации совпадает с направлением z, а направление распространения лежит в плоскости x-z. Направление z принимается положительным в сторону ионосферы, ось x считается положительной в направлении распространения, а ось y перпендикулярна плоскости распространения. Таким образом, поле не зависит от направления y, а зависимость от направления x имеет вид  $\exp(-ik \sin \theta_x)$ , где  $k$  – величина вектора распространения в свободном пространстве, а  $\theta$  – угол между направлением вектора распространения и направлением z в точке в стратифицированной среде, где модифицированный индекс рефракции равен единице. Предполагается, что все параметры поля характеризуются зависимостью вида  $\exp(i\omega t)$ , где  $\omega$  – угловая частота.

Коэффициент возбуждения мод и функции усиления мод за счет высоты являются двумя параметрами, необходимыми для расчета напряженности электрического поля. В таблице 2 приведены формулы для расчета коэффициента возбуждения. Заголовки столбцов относятся лишь к возбуждению компонент электрического поля  $E_z$ ,  $E_y$  и  $E_x$ , а заголовки строк – к возбуждению вертикальным диполем ( $\lambda_V$ ), торцом горизонтального диполя ( $\lambda_E$ ) и горизонтальным диполем поперечного излучения ( $\lambda_B$ ).

ТАБЛИЦА 2

#### Коэффициенты возбуждения

Компонента поля	$E_z$	$E_y$	$E_x$
Возбудитель			
$\lambda_V$	$B_1 \frac{(1 + \bar{R}_{\parallel})^2 (1 - \bar{R}_{\perp} R_{\perp})}{\bar{R}_{\parallel} D_{11}}$	$\frac{-B_1}{S} \frac{\bar{R}_{\perp} (1 + \bar{R}_{\parallel}) (1 + \bar{R}_{\perp})}{D_{12}}$	$\frac{B_1}{S} \frac{(1 + \bar{R}_{\parallel})^2 (1 - \bar{R}_{\perp} R_{\perp})}{\bar{R}_{\parallel} D_{11}}$
$\lambda_E$	$B_2 \frac{(1 + \bar{R}_{\parallel})^2 (1 - \bar{R}_{\perp} R_{\perp})}{\bar{R}_{\parallel} D_{11}}$	$\frac{-B_2}{S} \frac{\bar{R}_{\perp} (1 + \bar{R}_{\parallel}) (1 + \bar{R}_{\perp})}{D_{12}}$	$\frac{B_2}{S} \frac{(1 + \bar{R}_{\parallel})^2 (1 - \bar{R}_{\perp} R_{\perp})}{\bar{R}_{\parallel} D_{11}}$
$\lambda_B$	$B_2 \frac{\bar{R}_{\perp} (1 + \bar{R}_{\perp}) (1 + \bar{R}_{\parallel})}{D_{12}}$	$\frac{-B_2}{S} \frac{(1 + \bar{R}_{\perp})^2 (1 - \bar{R}_{\parallel} R_{\parallel})}{\bar{R}_{\perp} D_{22}}$	$\frac{B_2}{S} \frac{\bar{R}_{\perp} (1 + \bar{R}_{\perp}) (1 + \bar{R}_{\parallel})}{D_{12}}$

$R$  и  $\bar{R}$  представляют собой элементы матрицы отражения для направлений в сторону ионосферы и сторону земли, соответственно, с одного и того же уровня  $d$  в волноводе.  $B_1$  и  $B_2$  определяются следующим образом:

$$B_1 = \frac{S^{5/2}}{\left. \frac{\partial F}{\partial \theta} \right|_{\theta = \theta_n}} \quad B_2 = -\frac{B_1}{S}, \quad (38)$$

где  $S$  – синус собственного угла, а знаменатель представляет собой производную модального уравнения при собственном угле,  $\theta_n$ .

Коэффициенты возбуждения должны быть дополнены значениями выигрыша за счет высоты.

Напряженность поля можно рассчитать для возбуждителей в виде электрических диполей произвольной ориентации, расположенных внутри волновода на любой высоте. Таким образом, можно рассматривать проблемы распространения ОНЧ/НЧ волн на трассах воздух–воздух, земля–воздух или воздух–земля внутри горизонтально неоднородного волноводного канала. На рисунке 24 показана ориентация диполя относительно геометрии распространения, при которой ось  $z$  всегда перпендикулярна к искривленной поверхности Земли. Углы  $\gamma$  и  $\varphi$  характеризуют ориентацию передатчика относительно координатной системы  $x, y, z$ .

Из рисунка 24 видно, что  $\gamma = 0^\circ$  соответствует возбуждению от вертикального диполя, а  $\gamma = 90^\circ$  – возбуждению от горизонтального диполя.  $\varphi$  также является углом между ориентацией горизонтального диполя и направлением распространения. Ясно, что  $\varphi = 0$  соответствует излучению продольного диполя, а  $\varphi = 90^\circ$  – излучению поперечного диполя.

#### 4.2 Модель WKВ и суммы мод горизонтальной однородности

Помимо вертикальной неоднородности в ионосферном волноводе может существовать горизонтальная неоднородность. В частности, изменение констант распространения вдоль трассы по дуге большого круга может быть следствием либо горизонтальной изменчивости ионосферы, возникающей из-за непостоянства проводимости почвы и/или ее диэлектрической проницаемости, либо результатом изменений напряженности и ориентации геомагнитного поля. В тех случаях, когда волновод Земля–ионосфера не может считаться горизонтально однородным вдоль трассы распространения, для суммирования мод используется модель WKВ. Эта модель точна, когда изменения параметров мод происходят вдоль трассы достаточно медленно.

В отношении коэффициентов возбуждения и выигрыша за счет высоты уравнения суммарной WKВ моды можно записать в виде функции дальности распространения.

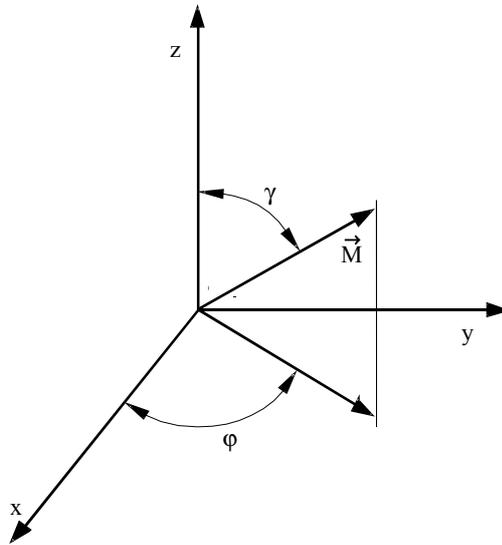
Если трассу распространения можно считать горизонтально однородной по всей длине, уравнение намного упрощается:

$$\left( \lambda \frac{T}{V} = \lambda \frac{R}{V} \right), \left( \lambda \frac{T}{B} = \lambda \frac{R}{B} \right) \text{ и } \left( \lambda \frac{T}{E} = \lambda \frac{R}{E} \right), \quad \text{а также } \left( \bar{S} \frac{T}{n} = \bar{S} \frac{R}{n} \right) \quad (39)$$

и может быть использовано для расчета полей многомодового распространения на ОНЧ и НЧ. Этими уравнениями можно также пользоваться на КНЧ. Однако из-за малых скоростей затухания, которые характерны для нижней части диапазона КНЧ, может возникать существенная интерференция между сигналами, распространяющимися по длинной и короткой трассе.

РИСУНОК 24

Ориентация диполя  $\vec{M}$  внутри волновода, где  $\gamma$  – наклонение, а  $\varphi$  – азимутальная ориентация



0684-24

### 4.3 Суммирование мод методом их преобразования

Для условий распространения, при которых нельзя считать, что свойства волновода Земля–ионосфера меняются медленно, необходимо использовать методы преобразования мод. Примерами ситуаций, когда для расчета значений напряженности поля требуются процедуры преобразования мод, служат передачи вдоль области терминатора в дневное–ночное время или случаи, когда на трассе распространения встречаются существенные изменения проводимости земной поверхности, например, как при переходе от суши к морю. Модель преобразования мод позволяет учесть любое произвольное число и порядок мод по обе стороны от неоднородности в волноводе. С помощью этой модели можно также рассчитать как горизонтальные, так и вертикальные составляющие электрического поля на любой высоте в волноводе.

Программа преобразования мод (см. ссылки в AGARDograph No. 326, ed. J. H. Richter, p. 40-62, 1990) основана на слоистой модели, показанной на рисунке 25. Предполагается инвариантность в направлении  $y$ , а отражением от горизонтальных неоднородностей пренебрегают. Благодаря этим предположениям и предположению об единичной амплитуде волны моды  $k$ , падающей в области передатчика (слой NTR), обобщенный коэффициент преобразования моды  $a_k^p$  для  $p$ -го слоя, с помощью которого осуществляется преобразование  $k$ -й моды в  $j$ -ю, можно выразить через коэффициенты предыдущего,  $(p + 1)$ -го слоя и записать в виде:

$$\sum_{j=1}^j a_{ik}^p I_{n,j}^{p,p} = I_{n,k}^{p,p+1} \quad \text{для } p = NTR - 1$$

$$= \sum_{j=1}^j a_{jk}^{p+1} \left[ -i k S_j^{p+1}(x_p - x_{p+1}) \right] I_{n,k}^{p,p+1} \quad \text{для } 1 \leq p < NTR - 1,$$
(40)

где:

$$i = (-1)^{1/2};$$

$k$ : волновое число в свободном пространстве;

$S_j$ : синус  $j$ -го собственного угла для  $p$ -го слоя;

$j$ : общее число мод, которые считаются важными для определения общего поля.

Критическим моментом при решении системы уравнений (40) является оценка интеграла:

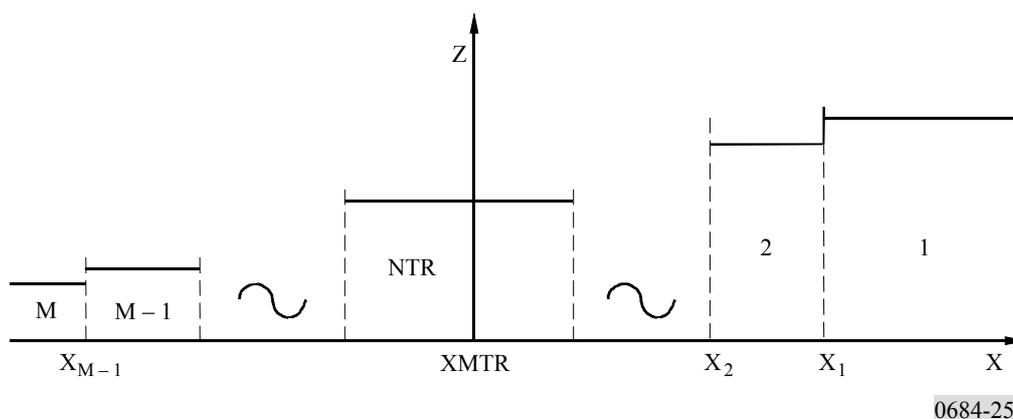
$$I_{j,k}^{m,p} = \int_{-\infty}^{\infty} A_j^{mt} \cdot G_k^p dz, \quad (41)$$

где  $t$  обозначает коэффициент соседнего участка, а  $G^p$  – четырехэлементную матрицу-столбец выигрыша за счет высоты для компонент  $y$  и  $z$  напряженности электрического и магнитного поля  $k$ -й моды в  $p$ -м слое.

Член  $A_j^m$  представляет собой четырехэлементную матрицу-столбец выигрышей за счет высоты для соответствующего соседнего участка волновода.

РИСУНОК 25

Модель преобразования мод



Опять, как и в случае процедуры суммирования мод с помощью модели WKВ, расчеты напряженности поля можно проводить для возбудителей в виде электрического диполя с произвольной ориентацией, расположенных на любой высоте внутри волновода. Таким образом, можно рассматривать проблемы распространения ОНЧ/НЧ волн на трассах воздух–воздух, земля–воздух или воздух–земля в горизонтально неоднородном волноводном канале.

В процедуре преобразования мод имеются два различных варианта. Первый позволяет рассчитывать поле (амплитуду и фазу) в зависимости от дальности для фиксированного положения горизонтальной неоднородности. Второй позволяет рассчитывать поле в различных точках приема на трассе вдоль дуги большого круга в зависимости от положения горизонтальной неоднородности (этот вариант полезен только в том случае, если проводимость земной поверхности и геомагнитные параметры инвариантны вдоль трассы). Амплитуда выражена в дБ выше микровольт на метр для излучателя мощностью 1 кВт, а фаза – в градусах по отношению к свободному пространству.

#### 4.4 Параметры ионосферы

Параметрами ионосферы, необходимыми для расчета значений напряженности поля на КНЧ/ОНЧ/НЧ, являются следующие профили, зависящие от высоты ионосферы,  $Z$ . Это профиль концентрации электронов, профили концентраций положительных и отрицательных ионов, профиль частоты столкновений электронов с нейтральными частицами и профили частоты столкновений положительных и отрицательных ионов с нейтральными частицами.

Удобным параметром, основанным на вышеназванных профилях, является проводимость ионосферы,  $\omega_r$ , которая зависит от высоты  $Z$ . Этот параметр описывается выражением:

$$\omega_r(Z) = \frac{\omega_p^2(Z)}{\nu(Z)} = \frac{q^2}{\epsilon_0} \left[ \frac{N_e(Z)}{m_e \nu_e(Z)} + \frac{N_+(Z)}{m_+ \nu_+(Z)} + \frac{N_-(Z)}{m_- \nu_-(Z)} \right], \quad (42)$$

где:

- $\omega_p(Z)$ : плазменная частота;
- $q$ : заряд электрона;
- $\epsilon_0$ : диэлектрическая проницаемость свободного пространства;
- $\nu_e$ : частота столкновений электронов с нейтральными частицами ( $\text{с}^{-1}$ );
- $\nu_+$ : частота столкновений положительных ионов с нейтральными частицами ( $\text{с}^{-1}$ );
- $\nu_-$ : частота столкновений отрицательных ионов с нейтральными частицами ( $\text{с}^{-1}$ );
- $N_e$ : концентрация электронов ( $\text{см}^{-3}$ );
- $N_+$ : концентрация положительных ионов ( $\text{см}^{-3}$ );
- $N_-$ : концентрация отрицательных ионов ( $\text{см}^{-3}$ );
- $m_e$ : масса электрона;
- $m_+$ : масса положительных ионов;
- $m_-$ : масса отрицательных ионов.

В большинстве случаев распространения на ОНЧ или НЧ необходимо учитывать только профили концентрации электронов и частоты столкновений электронов с нейтральными частицами. В этом случае параметр проводимости,  $\omega_r(Z)$ , можно записать в экспоненциальном виде:

$$\omega_r(Z) = \omega_0 \exp [\beta (Z - H')], \quad (43)$$

где:

- $\beta$ : параметр градиента в единицах обратной высоты, и
- $H'$ : эталонная высота.

Тогда параметрами ионосферы, необходимыми в качестве исходных для мультимодовых компьютерных программ, являются профиль концентрации электронов и профиль эффективной частоты столкновений электронов с нейтральными частицами. Эти члены могут быть выражены в виде экспоненциальной зависимости от частоты и определяются параметрами  $\beta$  ( $\text{км}^{-1}$ ) и  $H'$  (км).

Величина концентрации электронов  $N(Z)$ , ( $\text{эл}/\text{см}^3$ ) рассчитывается как функция высоты  $Z$  (км) с помощью уравнения:

$$N(Z) = \{1,43 \times 10^7 \times \exp(-0,15 H')\} \{\exp(\beta - 0,15)(Z - H')\} \quad \text{эл}/\text{см}^3 \quad (44)$$

Профиль частоты столкновений, используемый для расчета, имеет вид:

$$\nu(Z) = \nu_0 \exp(-\alpha Z), \quad (45)$$

где:

$$\begin{aligned} Z: & \text{ высота (км);} \\ \nu_0: & 1,82 \times 10^{11} \text{ столкновений/с;} \\ \alpha: & 0,15 \text{ км}^{-1}. \end{aligned}$$

Сочетание концентрации электронов и частоты столкновений дает профиль проводимости ионосферы в виде:

$$\omega_r(Z) = 2,5 \times 10^5 \exp[\beta(Z - H')] \quad (46)$$

Несомненная польза такой модели ионосферы объясняется простотой ее применения и успешным моделированием с ее помощью экспериментальных данных измерений. Значения параметров  $\beta$  и  $H'$  определяются путем сравнения результатов измерений с теоретическими расчетами и соответствующей корректировки параметров этих расчетов с целью достижения приемлемой согласованности. Сравнение можно осуществить наиболее простым способом, если собрать данные измерений в большом числе точек на трассе распространения вдоль дуги большого круга, которая включает передатчик. Легче всего собрать такие данные на борту воздушного судна.

Вообще говоря, следует считать, что модели ионосферы, полученные с помощью описанной выше процедуры, описывают усредненную ионосферу, поскольку в процессе моделирования предполагается, что ионосфера остается статичной в течение любого периода полета воздушного судна. В процедуре подгонки данных делается попытка найти схему вычисления амплитуды в зависимости от расстояния, которая согласовывалась бы с крупномасштабными характеристиками измеренных данных. Поэтому многие небольшие изменения амплитуды усредняются. Возможно, что в некоторых случаях будут найдены профили, обеспечивающие более точное соответствие результатам измерений, но отличающиеся более сложной формой, чем экспоненциальная, однако, поскольку считается, что трассы распространения имеют достаточно большую длину, то любой профиль, лучше всего соответствующий экспериментальным данным, фактически будет средним профилем для трассы в целом.

Анализ имеющихся результатов измерений позволяет предложить использовать следующие параметры для прогнозирования распространения на ОНЧ/НЧ. В дневное время суток на всех широтах и для всех сезонов используйте значения  $\beta = 0,3$  и  $H' = 74$ . В ночное время характеристики ионосферы имеют более сложный характер, поскольку  $\beta$  меняется линейно в зависимости от частоты от 0,3 на частоте 10 кГц до 0,8 на частоте 60 кГц. На низких и средних геомагнитных широтах ионосфера в ночное время характеризуется значением  $H'$ , равным 87 км, тогда как в области полярных широт  $H'$  равно 80 км. Значения этих параметров передачи на частоте 30 кГц приведены в таблице 3. В этой таблице показаны переходы, которые происходили бы на гипотетической трассе, проходящей через полюс, при смене дня на ночное время.

ТАБЛИЦА 3

## Переходные параметры ионосферного профиля на частоте 30 кГц

Солнечный зенитный угол, $\chi$	$\beta$	$H'$ (км)	Угол магнитного наклона, $D$
$\chi < 90,0$	0,3	74,0	$D < 70$
$90,0 < \chi < 91,8$	0,33	76,2	$70 < D < 72$
$91,8 < \chi < 93,6$	0,37	78,3	$72 < D < 74$
$93,6 < \chi < 95,4$	0,40	80,5	$74 < D < 90$ (полюс)
$95,4 < \chi < 97,2$	0,43	82,7	$72 < D < 74$
$97,2 < \chi < 99,0$	0,47	84,4	$70 < D < 72$
$99,0 < \chi < (\text{ночью})$	0,50	87,0	$D < 70$

На рисунке 26 показаны характерные соотношения в зависимости от некоторых экспоненциальных профилей для дневных условий, а на рисунке 27 – для ночных.

Профили концентрации электронов и ионов, предложенные для распространения волн в диапазоне КНЧ, показаны на рисунке 28.

Предлагаемые профили частоты столкновений электронов и ионов на КНЧ приведены в таблицах 4 и 5.

РИСУНОК 26

## Дневные профили концентрации электронов и профиль частоты столкновений

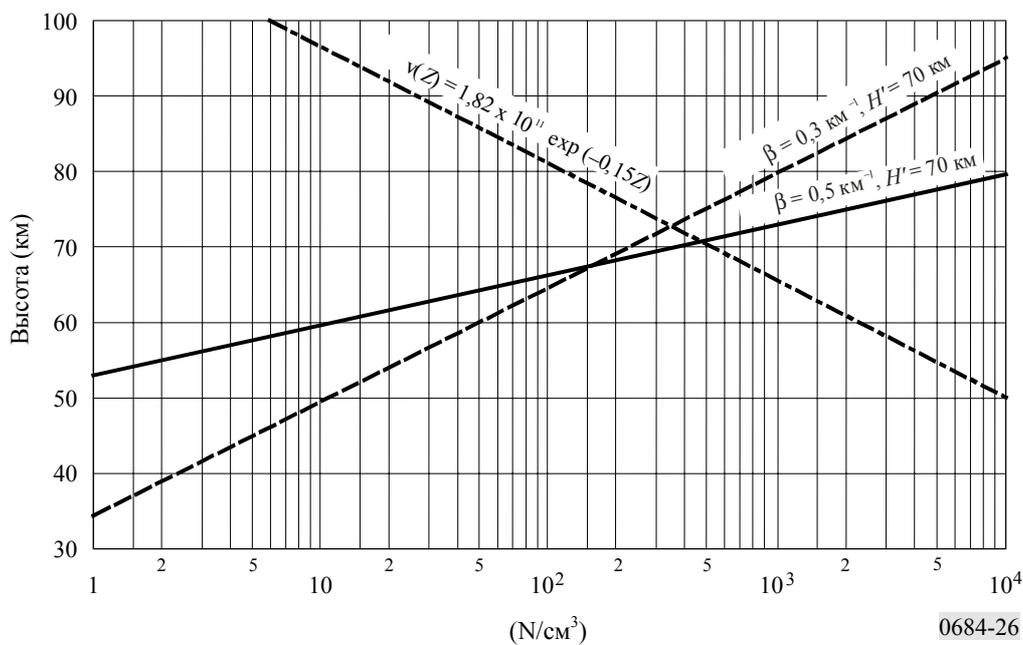


РИСУНОК 27

## Ночные профили концентрации электронов и профиль частоты столкновений

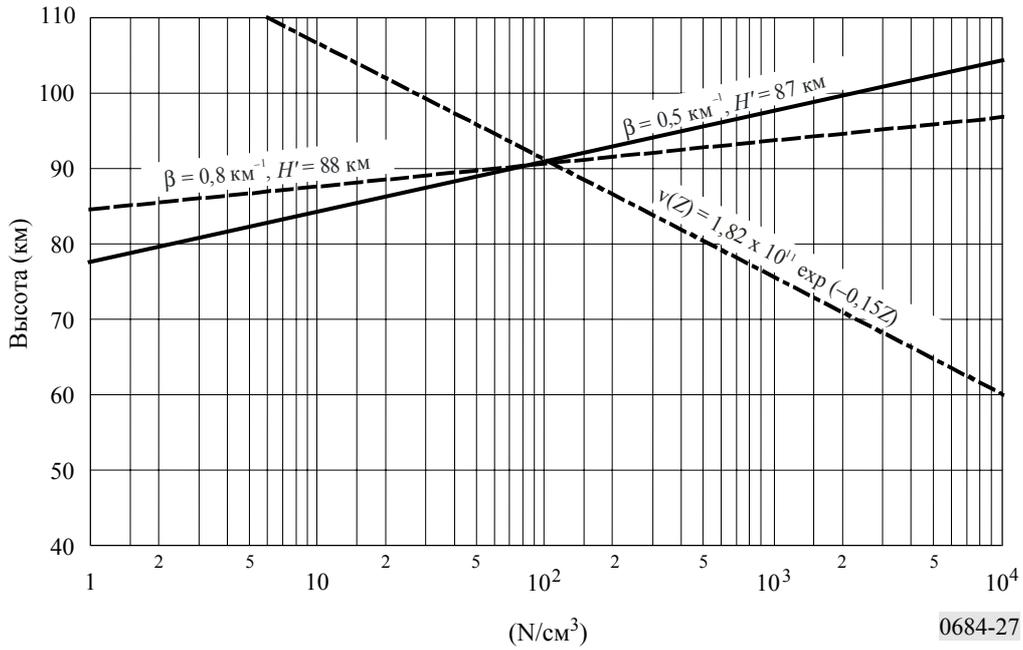
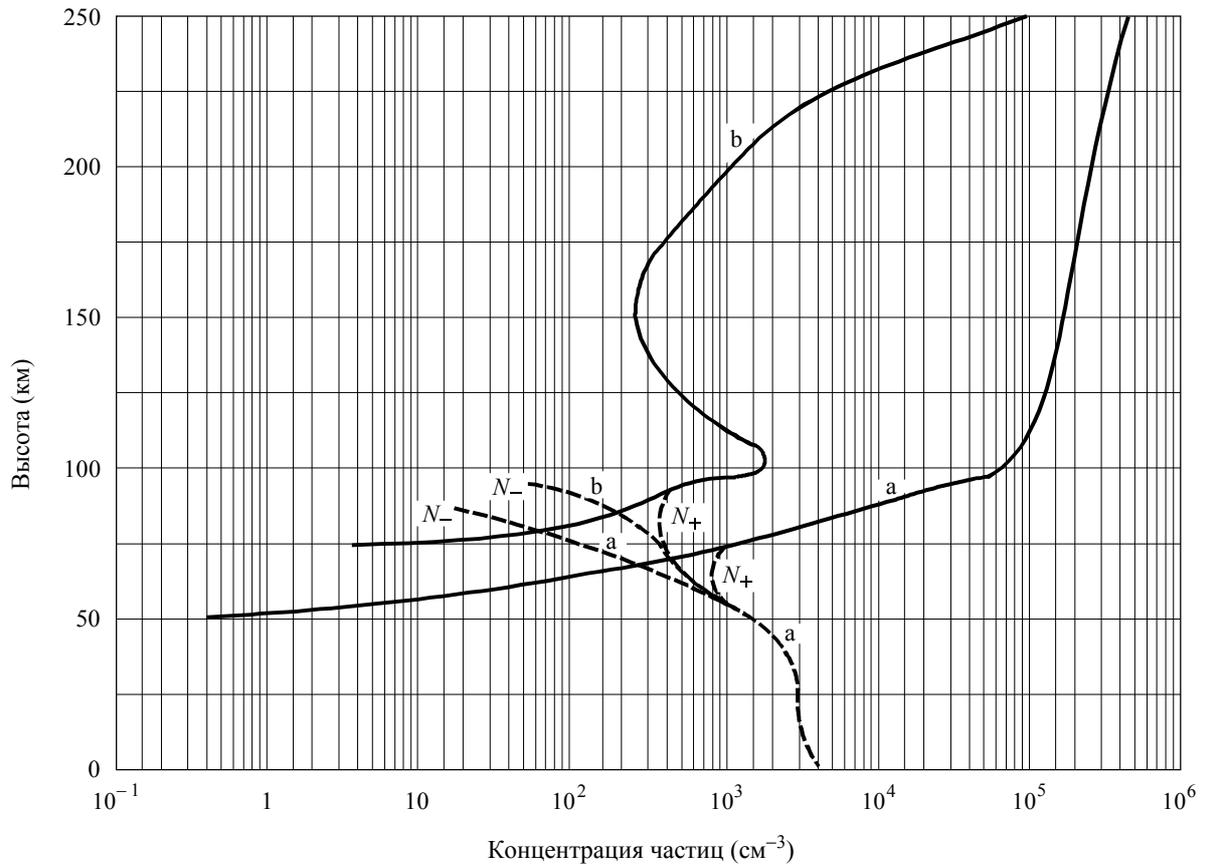


РИСУНОК 28

## Дневные и ночные профили различных элементов окружающей среды



— Электроны

- - - Ионы

а: день

б: ночь

0684-28

ТАБЛИЦА 4

**Частота столкновений электронов и ионов в ионосфере в с<sup>-1</sup>  
в зависимости от высоты в дневное время суток**

Высота (км)	Электроны	Положительные ионы	Отрицательные ионы
260	$6,6 \times 10^2$	1,02	1,02
230	$5,3 \times 10^2$	2,00	2,00
210	$4,8 \times 10^2$	3,10	3,10
200	$5,0 \times 10^2$	4,00	4,00
180	$6,0 \times 10^2$	$1,30 \times 10$	$1,30 \times 10$
170	$8,0 \times 10^2$	$2,40 \times 10$	$2,40 \times 10$
150	$1,6 \times 10^3$	$9,00 \times 10$	$9,00 \times 10$
120	$1,0 \times 10^4$	$6,00 \times 10^2$	$6,00 \times 10^2$
100	$3,9 \times 10^4$	$1,60 \times 10^4$	$1,60 \times 10^4$
0	$4,3 \times 10^{11}$	$2,14 \times 10^{10}$	$2,14 \times 10^{10}$

ТАБЛИЦА 5

**Частота столкновений электронов и ионов в ионосфере в с<sup>-1</sup>  
в зависимости от высоты в ночное время суток**

Высота (км)	Электроны	Положительные ионы	Отрицательные ионы
250	$1,05 \times 10^2$	$4,50 \times 10$	$4,50 \times 10$
225	$3,50 \times 10$	$9,00 \times 10$	$9,00 \times 10$
220	$3,00 \times 10$	1,00	1,00
210	$3,30 \times 10$	1,30	1,30
200	$4,50 \times 10$	2,00	2,00
150	$1,60 \times 10^3$	$4,50 \times 10$	$4,50 \times 10$
120	$1,00 \times 10^4$	$3,00 \times 10^2$	$3,00 \times 10^2$
100	$3,90 \times 10^4$	$8,00 \times 10^3$	$8,00 \times 10^3$
0	$4,30 \times 10^{11}$	$1,07 \times 10^{10}$	$1,07 \times 10^{10}$

#### 4.5 Геомагнитные и геофизические параметры

Другими параметрами, необходимыми для расчета уровней сигналов на КНЧ/ОНЧ/НЧ, являются параметры, характеризующие ориентацию и напряженность магнитного поля Земли вдоль трассы распространения, а также параметры, показывающие величину комплексной диэлектрической постоянной земной поверхности в зависимости от частоты распространения.

Параметры, описывающие магнитное поле Земли, – это величина геомагнитного поля, магнитный азимут (в градусах к востоку от севера) направления распространения и угол наклона, измеренный от горизонтальной составляющей (совпадающей с наклоном) вектора магнитного поля. Эти параметры изменяются вдоль трассы распространения, и соответствующие изменения учтены в формулах WKB-модели или преобразования мод.

Комплексная относительная диэлектрическая проницаемость Земли,  $N_g$ , определяется как:

$$N_g = \varepsilon / \varepsilon_0 - i \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0}, \quad (47)$$

где:

- $\sigma$ : проводимость почвы;
- $\varepsilon / \varepsilon_0$ : относительная диэлектрическая проницаемость почвы;
- $\varepsilon_0$ : диэлектрическая проницаемость свободного пространства;
- $\omega$ : угловая частота распространения.

В таблице 1 представлены рекомендованные значения этих параметров.

## 5 Обсуждение

Методы скачковых и волноводных мод, подробно описанные в настоящей Рекомендации, следует использовать для прогнозирования напряженности поля на частотах ниже примерно 150 кГц, пока не будут предложены более совершенные методы. Хотя волноводно-модовая программа распространения, подробно описанная в настоящей Рекомендации, может использоваться для прогнозирования напряженности поля на КНЧ (от 50 Гц до 3000 Гц), для нижней части этого диапазона разработаны более простые методы.

Краткое обсуждение вопросов, связанных с точностью данных методов, приводится в Приложении 2. В Приложении 3 можно найти ряд интересных результатов, полученных при использовании программы прогнозирования распространения на основе волноводной моды, которые подтверждают полезность этой программы.

## Приложение 1

### Пример полного расчета амплитуды и фазы поля с помощью скачкового метода, описанного в п. 2

Пусть необходимо рассчитать ожидаемую напряженность поля в дневное время суток, летом, в период минимума солнечного цикла при использовании в качестве передающей и приемной антенн короткого вертикального диполя и соблюдении следующих условий:

Длина трассы	$d = 1911$ км
Частота	$f = 80$ кГц
Характеристики места расположения передатчика на земле	$\left\{ \begin{array}{l} \sigma = 2 \times 10^{-3} \text{ Сим/м} \\ \varepsilon = 15 \varepsilon_0 \end{array} \right.$
Характеристики места расположения приемника на море	$\left\{ \begin{array}{l} \sigma = 5 \text{ Сим/м} \\ \varepsilon = 80 \varepsilon_0 \end{array} \right.$
Излучаемая мощность	$p_t = 0,4$ кВт

Последовательные этапы расчета следующие:

Этап	Параметры	Рисунки	Рассчитываемые члены	Значения
1	$p_t = 0,4$ кВт		$V_u = 300\sqrt{0,4}$	= 190 В
2	$d = 1\,911$ км	2	$\psi$ $i$	$\approx -0,36^\circ$ = $81^\circ$
3	$\psi = -0,36^\circ$	8	$F_t$	= 0,36
4	$\psi = -0,36^\circ$	7	$F_r$	= 0,67
5	$d = 1\,911$ км $c = 3 \times 10^5$ км/с	4	$L - d$ $L = 1\,911 + (46 \times 10^{-6} \times 3 \times 10^5)$	= 46 мкс = 1 925 км
6	$d = 1\,911$ км	5	$D$	= 2,16
7	$f = 80$ кГц $i = 81^\circ$		$f \cos i = 80 \cos 81^\circ$	= 12,5 кГц
8	$f \cos i = 12,5$ кГц день минимума солнечной активности (лето)	10	$\ R_{\parallel}$	= 0,11
9			$E_s$	= $11,4 \times 10^{-3}$ мВ/м
10	$h = 70$ км (день) $h = 90$ км (ночь) $d = 1\,911$ км (1 скачок)	4	Дифференциальная временная задержка	= 67 – 47 = 20 мкс = 1,6 цикла (то есть $576^\circ$ ) на частоте 80 кГц

## Приложение 2

### Точность методов

Поскольку скачковый метод был разработан в основном с использованием данных наблюдений на средних широтах в Районах 1 и 2 МСЭ, его необходимо проверить на всемирной основе. Было найдено, однако, что этот метод позволяет получить прогноз медианного значения напряженности поля на высоких широтах в Районе 2 с приемлемой точностью. Данный скачковый метод можно использовать в диапазоне НЧ на частотах между примерно 60 кГц и 150 кГц.

При использовании этого метода необходимо принимать во внимание механизмы распространения земной волны (Рекомендация МСЭ-R P.368), а также информацию, содержащуюся в названной Рекомендации и Справочнике МСЭ-R по ионосфере и ее влиянию на распространение радиоволн, которая позволяет учесть поправочный коэффициент антенны в вертикальной плоскости.

Метод волноводной моды можно использовать для прогнозирования напряженности поля на частотах до примерно 60 кГц, приняв значение ионосферных параметров  $\beta/H'$  трасс для дневного времени суток равным 0,3/74, пока не будут получены дополнительные результаты, учитывающие влияние времени года, солнечной активности и частоты. Более подробная модель для ночного времени суток, отражающая функциональную зависимость от частоты и широты, приведена в настоящей Рекомендации.

Поскольку нижней границей волновода является Земля, карта проводимости почвы во всемирном масштабе (например, Рекомендация МСЭ-R P.832) должна входить в виде составной части в программу, разработанную для всемирного применения. Карта проводимости почвы, которая в настоящее время используется в программе прогнозирования распространения длинных волн в волноводах в Соединенных Штатах Америки и Канаде, в основном основана на геологических характеристиках.

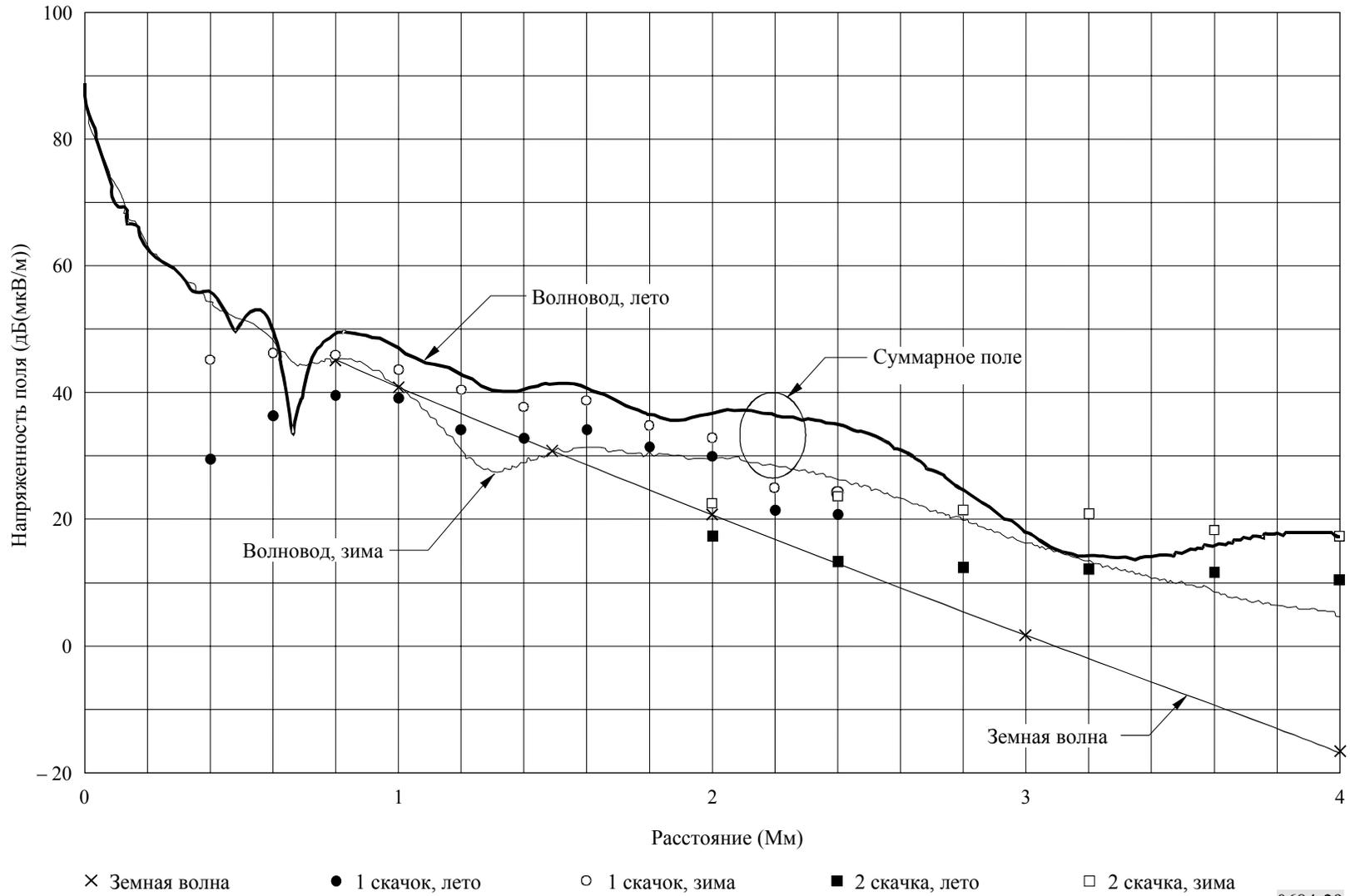
Альтернативные методы расчета значений напряженности поля в ночное время на НЧ и выше до частоты 1705 кГц приведены в Справочнике МСЭ-R по ионосфере и ее влиянию на распространение радиоволн. Следует провести взаимное сравнение результатов, полученных с помощью метода, предложенного в настоящей Рекомендации (скачковый метод). Естественно, что результаты прогнозов напряженности поля, полученные с помощью альтернативных методов, для одинаковых частот и расстояний должны быть сопоставимы.

НЧ пространственные волны, распространяющиеся в дневное время зимой, по меньшей мере на 20 дБ сильнее, чем летом, и могут быть лишь на 10 дБ ниже значений для ночного времени. НЧ пространственные волны сильнее в ночное время летом и зимой, но слабее весной и осенью. Уровни напряженности поля пространственных волн на НЧ, отмеченные в середине дня, могут быть весьма значительными, особенно в зимние месяцы. Годовые медианные значения напряженности поля в дневное время обычно на 20 дБ ниже, чем для ночного времени. Дополнительные инструкции см. также в упомянутом выше Справочнике.

Скачковый метод можно использовать для прогнозирования напряженности поля на СЧ и НЧ вплоть до частот порядка 60 кГц. Метод волноводной моды используется для прогнозирования напряженности поля в диапазонах ОНЧ и НЧ при ограничении по частоте до примерно 60 кГц. На рисунке 29 показана напряженность поля в дневное время на частоте около 60 кГц, полученная с помощью двух названных методов прогнозирования (к сожалению в этом случае отсутствуют данные измерений, с которыми можно было бы сравнить результаты прогнозов). Непрерывные линии с пометками "лето" и "зима", получены с помощью программы прогнозирования по методу волноводной моды, используя параметры на рисунке 26 для лета ( $\beta = 0,5 \text{ км}^{-1}$ ,  $H' = 70 \text{ км}$ ) и зимы ( $\beta = 0,3 \text{ км}^{-1}$ ,  $H' = 72 \text{ км}$ ). Светлыми и темными кружками обозначены уровни напряженности поля летом и зимой, соответственно, рассчитанные скачковым методом. Никаких попыток сгладить данные в области перекрытия расстояний, где односкачковая пространственная волна отсекается и начинает преобладать двухскачковая пространственная волна, не предпринималось. Земная волна показана отдельно.

Метод волноводной моды позволяет рассчитать суммарное поле, создаваемое земной и пространственной волной. Скачковый же метод дает оценку амплитуды лишь пространственной волны. Поэтому при сравнении результатов в скачковом методе необходимо учесть напряженность поля земной волны. Метод волноводной моды использовался для прогнозирования напряженности поля в зависимости от расстояния для реальных трасс, берущих начало у гипотетического передатчика в Ванкувере и проходящих с запада на восток через Канаду и Соединенные Штаты Америки. Проводимость почвы вдоль трассы изменялась. В скачковом методе делается предположение о почве со средней проводимостью вдоль всей трассы, равной 3 м См/м.

РИСУНОК 29



0684-29

В соответствии со скачковым методом разность между дневной напряженностью поля летом и зимой уменьшается при уменьшении эффективной частоты ( $f \cos i$ ). Результаты, полученные для этого взаимного сравнения с помощью программы прогнозирования распространения по методу волноводной моды, показали обратные сезонные изменения. В программе использовались значения параметров ( $\beta/H'$ ), приведенные на рисунке 26. Следовательно, надо проявлять осторожность, о чем говорилось выше. Сезонные вариации предсказать нельзя, а значения параметров  $\beta/H'$  для всех времен года рекомендуется принимать равными 0,3/74.

### Приложение 3

#### Некоторые примеры расчетов с использованием метода волноводной моды

В настоящем Приложении приводятся некоторые расчеты, подтверждающие тот факт, что программа прогнозирования распространения радиоволн в волноводах (см. п. 4.3) позволяет получить значения напряженности поля, которые вполне соответствуют ожидаемым характеристикам рассматриваемой трассы (проводимость почвы) и ее ориентации по отношению к магнитному полю.

На рисунке 30 показана зона охвата в Северном полушарии для гипотетического передатчика, работающего на ОНЧ и расположенного в центральной части Канады. Расчеты (напряженность поля в дБ(мкВ/м)) проводились для излучаемой мощности 1 кВт на частоте 24 кГц. Заметим, что эти характеристики в основном соответствуют ожидаемым. Передачи с востока на запад отличаются более высоким качеством, чем с запада на восток; следует отметить интересную аномалию в контурах напряженности поля, которая является следствием очень низкой проводимости почвы в Гренландии. Заметно увеличение напряженности поля над Гудзоновым заливом, что объясняется более высокой проводимостью морской воды по сравнению с низкой проводимостью окружающей этот залив арктической зоны.

Далее следует еще один пример, показывающий, что проводимость почвы вдоль трассы в целом является важным фактором. В случае скачкового метода важна проводимость почвы лишь вблизи передающей и приемной антенн. На рисунках 32 и 33 показаны кривые спрогнозированных значений напряженности поля в зависимости от расстояния для трех частот, 15, 25 и 35 кГц, для гипотетической трассы, берущей начало в Галифаксе и проходящей над Канадским щитом и полуостровом Унгава, где почвы отличаются низкой проводимостью (трасса отмечена на рисунке 31). Низкая проводимость почвы вдоль этой трассы, проходящей над Канадским щитом, по-разному сказывается на разных частотах. В дневное время суток на этой трассе распространения лучше всего использовать частоту передачи порядка 25 кГц (см. рисунок 32). Разность частот менее заметна в ночное время (см. рисунок 33).

Ясно, что некоторые частности, приведенные на этих рисунках, невозможно было бы предвидеть без программы прогнозирования распространения.

РИСУНОК 30

Контуры напряженности поля (дБ(мкВ/м)) для гипотетического передатчика,  
расположенного в центральной Канаде, при излучаемой мощности 1 кВт

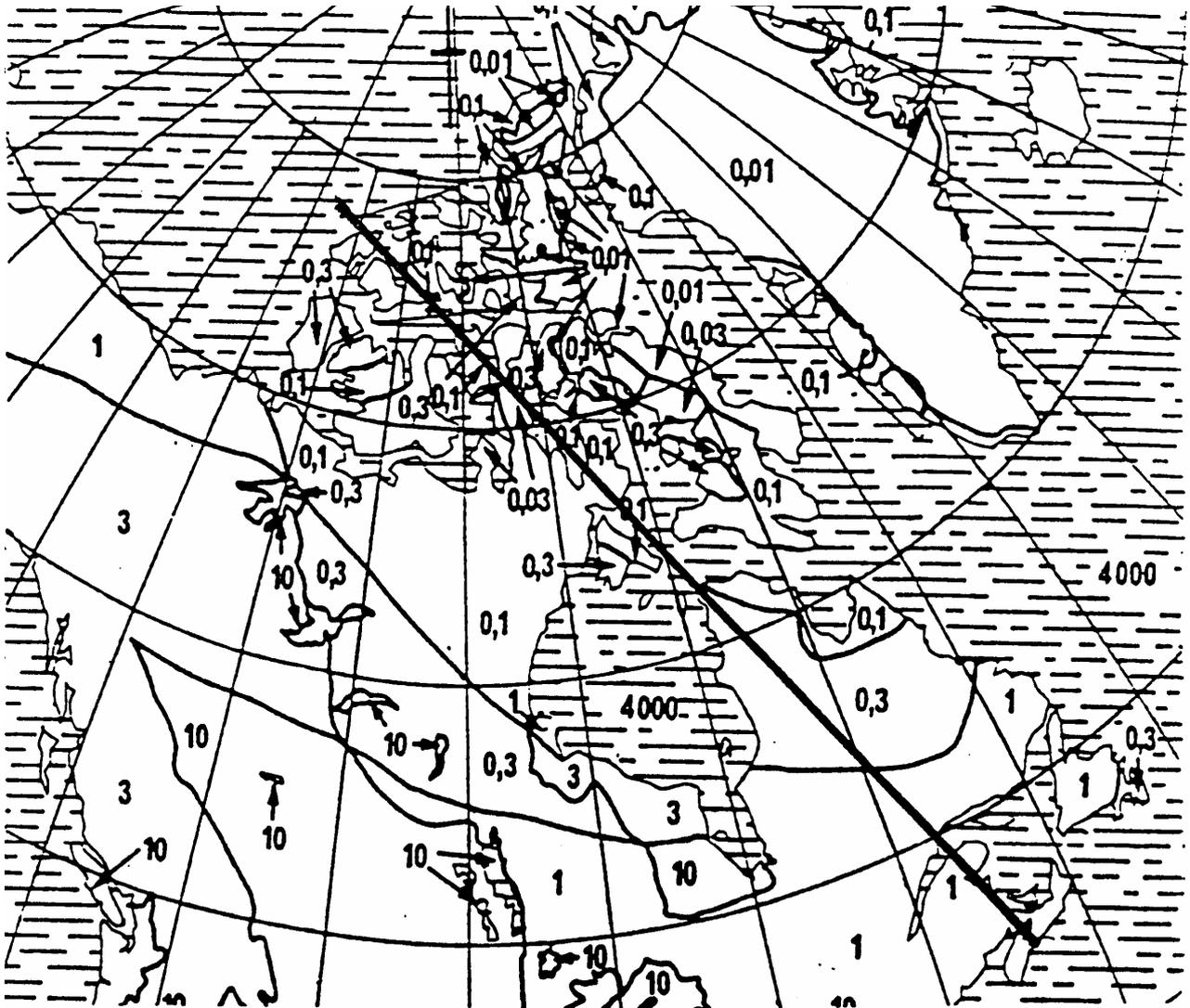
(Частота 24 кГц, лето, дневное время суток)



0684-30

РИСУНОК 31

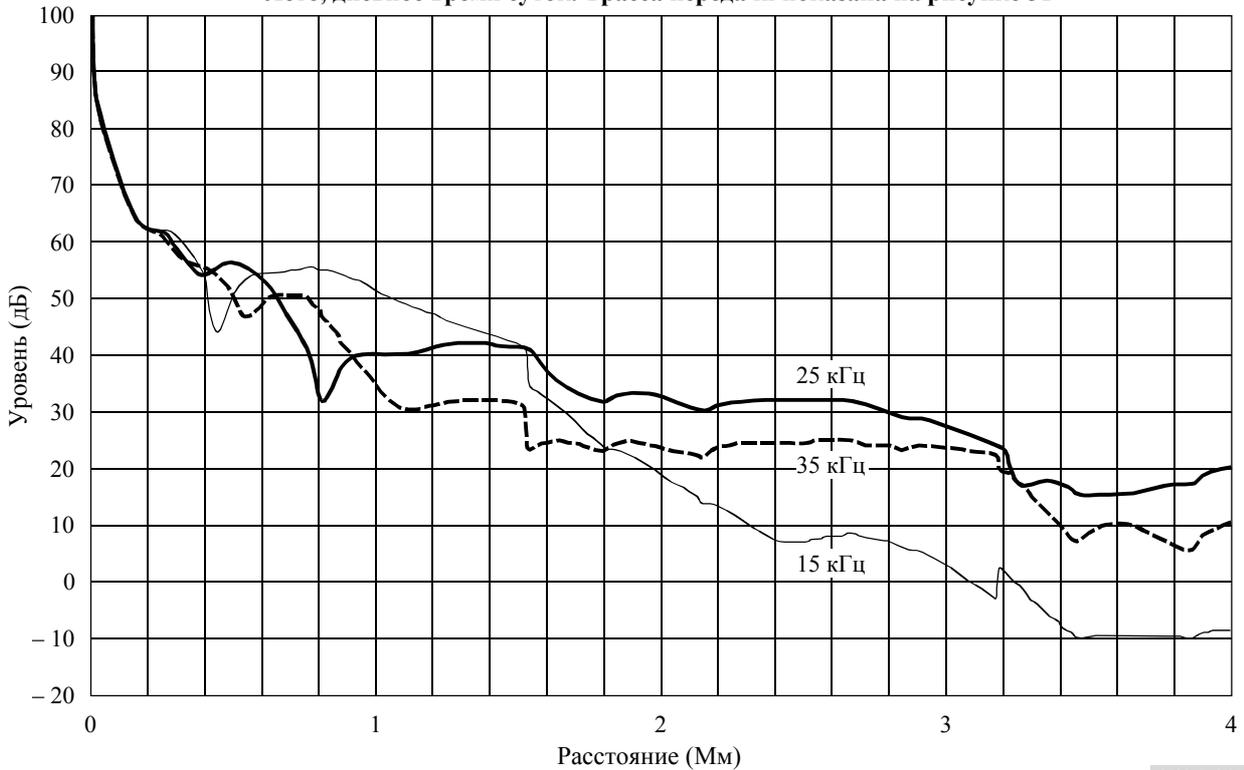
Карта проводимости почвы на ОНЧ для Канады и Арктики (м См/м)



0684-31

РИСУНОК 32

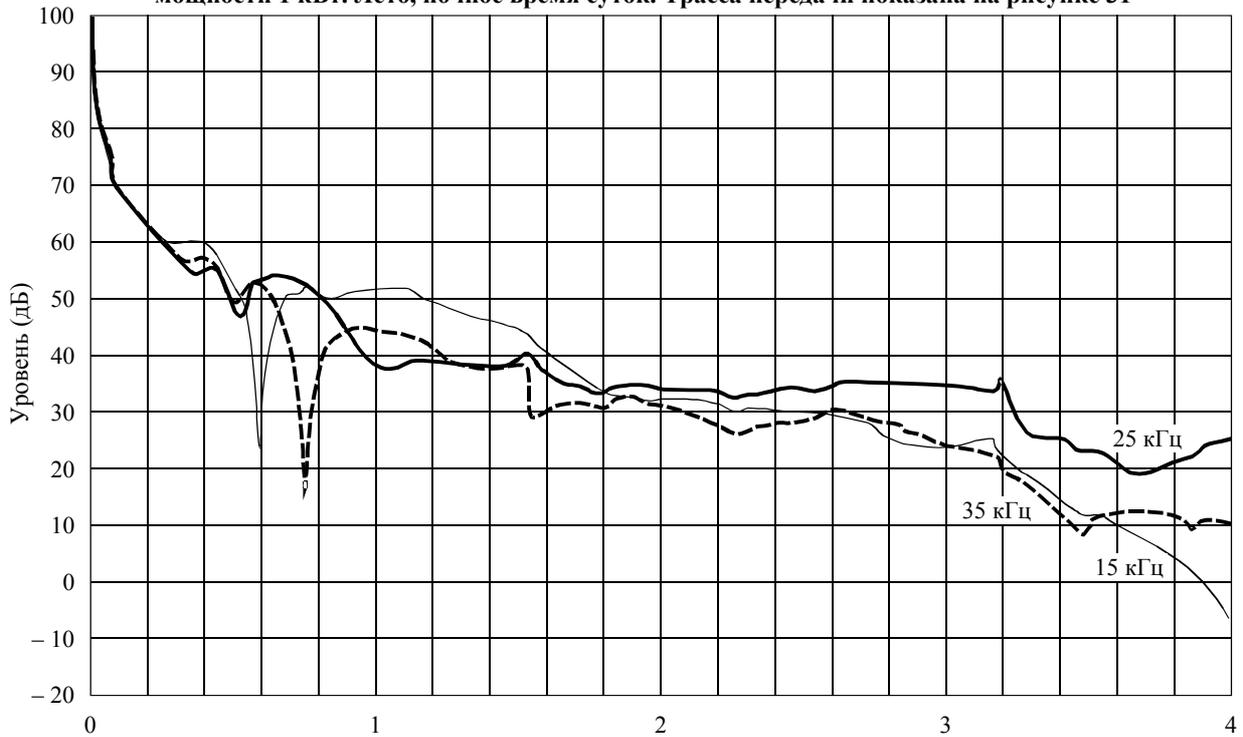
Кривые напряженности поля в зависимости от расстояния для гипотетического передатчика, расположенного в Галифаксе, при азимуте антенны  $340^\circ$  с. ш. для трех частот и излучаемой мощности 1 кВт. Лето, дневное время суток. Трасса передачи показана на рисунке 31



0684-32

РИСУНОК 33

Кривые напряженности поля в зависимости от расстояния для гипотетического передатчика, расположенного в Галифаксе, при азимуте антенны  $340^\circ$  с. ш. для трех частот и излучаемой мощности 1 кВт. Лето, ночное время суток. Трасса передачи показана на рисунке 31



0684-33