

Международный союз электросвязи

МСЭ-R

Сектор радиосвязи МСЭ

Рекомендация МСЭ-R Р.684-8
(08/2022)

Прогнозирование напряженности поля на частотах ниже приблизительно 150 кГц

Серия Р
Распространение радиоволн



Международный
союз
электросвязи

Предисловие

Роль Сектора радиосвязи заключается в обеспечении рационального, справедливого, эффективного и экономичного использования радиочастотного спектра всеми службами радиосвязи, включая спутниковые службы, и проведении в неограниченном частотном диапазоне исследований, на основании которых принимаются Рекомендации.

Всемирные и региональные конференции радиосвязи и ассамблеи радиосвязи при поддержке исследовательских комиссий выполняют регламентарную и политическую функции Сектора радиосвязи.

Политика в области прав интеллектуальной собственности (ПИС)

Политика МСЭ-R в области ПИС излагается в общей патентной политике МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК, упоминаемой в Резолюции МСЭ-R 1. Формы, которые владельцам патентов следует использовать для представления патентных заявлений и деклараций о лицензировании, представлены по адресу: <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/ru>, где также содержатся Руководящие принципы по выполнению общей патентной политики МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК и база данных патентной информации МСЭ-R.

Серии Рекомендаций МСЭ-R

(Представлены также в онлайн-форме по адресу: <http://www.itu.int/publ/R-REC/ru>.)

Серия	Название
BO	Спутниковое радиовещание
BR	Запись для производства, архивирования и воспроизведения; пленки для телевидения
BS	Радиовещательная служба (звуковая)
BT	Радиовещательная служба (телевизионная)
F	Фиксированная служба
M	Подвижные службы, служба радиоопределения, любительская служба и относящиеся к ним спутниковые службы
P	Распространение радиоволн
RA	Радиоастрономия
RS	Системы дистанционного зондирования
S	Фиксированная спутниковая служба
SA	Космические применения и метеорология
SF	Совместное использование частот и координация между системами фиксированной спутниковой службы и фиксированной службы
SM	Управление использованием спектра
SNG	Спутниковый сбор новостей
TF	Передача сигналов времени и эталонных частот
V	Словарь и связанные с ним вопросы

Примечание. – Настоящая Рекомендация МСЭ-R утверждена на английском языке в соответствии с процедурой, изложенной в Резолюции МСЭ-R 1.

Электронная публикация
Женева, 2023 г.

© ITU 2023

Все права сохранены. Ни одна из частей данной публикации не может быть воспроизведена с помощью каких бы то ни было средств без предварительного письменного разрешения МСЭ.

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R P.684-8

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

(Вопрос МСЭ-R 225/3)

(1990-1994-2001-2003-2005-2009-2012-2016-2022)

Сфера применения

В настоящей Рекомендации представлен метод волноводной моды и скачковый метод для прогнозирования напряженности поля на частотах ниже приблизительно 150 кГц.

Ключевые слова

Ионосферное распространение радиоволн, ELF, VLF, LF, траектория луча, пространственная волна

Сокращения/аббревиатуры

co-dip	the dip angle measured from the horizontal	совпадающей с наклоением	угол наклоения, измеренный от горизонтальной составляющей
ELF	extremely low frequency	КНЧ	крайне низкие частоты
F10.5	the 10.5 cm solar flux		поток радиоизлучения Солнца на длине волны 10,5 см
HF	high frequency	ВЧ	высокие частоты
LF	low frequency	НЧ	низкие частоты
MF	medium frequency	СЧ	средние частоты
VLF	very low frequency	ОНЧ	очень низкие частоты
WKB	Wentzel-Kramers-Brillouin		Вентцеля-Крамерса-Бриллюэна

Соответствующие Рекомендации МСЭ-R

Рекомендация МСЭ-R P.368

Рекомендация МСЭ-R P.832

Рекомендация МСЭ-R P.1147

Рекомендация МСЭ-R P.1239

ПРИМЕЧАНИЕ. – Следует использовать последний по времени пересмотр/издание Рекомендации/Справочника.

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.

СОДЕРЖАНИЕ

	<i>Стр.</i>
1 Введение.....	3
2 Скачковая теория распространения.....	3
2.1 Общее описание.....	3
2.2 Расчет напряженности поля методом траекторий луча.....	4
2.3 Численный метод для расчета результирующей напряженности поля и фазы.....	15
2.4 Прогнозирование для трасс распространения, превышающих 4000 км.....	22
3 Расчет напряженности поля с помощью волноводных мод: полное волновое решение ..	23
3.1 Матрица коэффициента ионосферного отражения, $R(\theta)$	24
3.2 Матрица коэффициента отражения от поверхности земли, $\bar{R}_d(\theta)$	25
3.3 Метод определения мод ("MODESRCH").....	25
4 Расчет напряженности поля	28
4.1 Необходимые параметры.....	28
4.2 Модель WKB и суммы мод горизонтальной однородности	30
4.3 Суммирование мод методом их преобразования	31
4.4 Параметры ионосферы.....	32
4.5 Геомагнитные и геофизические параметры.....	36
5 Обсуждение	37
Приложение 1 – Пример полного расчета амплитуды и фазы поля с помощью скачкового метода, описанного в п. 2	37
Приложение 2 – Точность методов	38
Приложение 3 – Некоторые примеры расчетов с использованием метода волноводной моды	41

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 Гц. 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 более высоких частот. 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 волноводных 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. Однако во многих случаях для расчета с достаточной точностью можно использовать скачковую модель на больших расстояниях для частот вплоть до 10 кГц, при этом можно ограничить количество подлежащих учету трасс до трех или, в редких случаях, до четырех. Распространение на КНЧ также можно описать в виде единственной волноводной моды.

2 Скачковая теория распространения

2.1 Общее описание

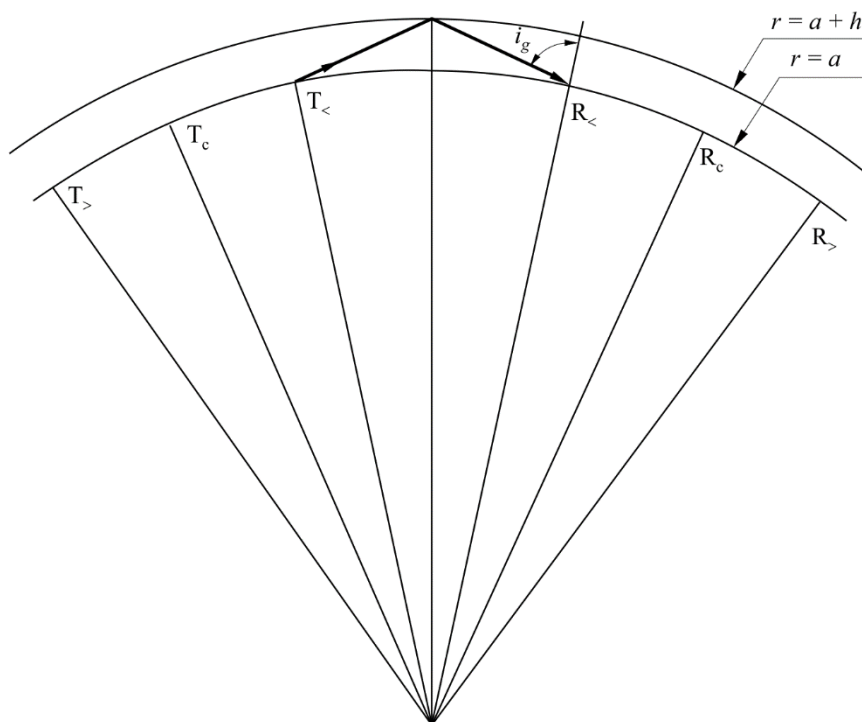
В соответствии с этой теорией поле пространственной волны (напряженность и фаза) в какой-либо точке считается векторной суммой полей, создаваемых различными волнами, распространяющимися непосредственно от передатчика путем одного или нескольких скачков. Таким образом, общее поле в этой точке является 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 90 градусов. Во втором две антенны расположены в критических точках T_c и R_c , для которых $i_g = 90$ градусов. 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)



P.0684-01

2.2 Расчет напряженности поля методом траекторий луча

Эталонная симомотивная сила¹, 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).

¹ Симомотивная сила 300 В – это сила, которая будет создана коротким вертикальным излучателем над идеально проводящей землей в направлении максимального излучения, величиной 1 кВт.

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

$$E_t = \frac{V_u}{L} \cos \psi \|R\| D F_t \quad \text{mV/m}, \quad (2)$$

где:

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

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

$$E_s = \frac{2V_u}{L} \cos \psi \|R\| D F_t F_r \quad \text{mV/m}. \quad (3)$$

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

$$E_s = \frac{2V_u}{L} (\cos \psi)^2 \|R\| D F_t F_r \quad \text{mV/m} \quad (4)$$

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 пространственной волны на двухскачковой трассе напряженность поля в точке расположения рамочной приемной антенны можно просто представить как:

$$E_s = \frac{2V_u}{L} \cos \psi \|R_1\| \|R_2\| D^2 D_G \|R_g\| F_t F_r \quad \text{mV/m} \quad (5)$$

где:

- D_G : коэффициент дивергенции, вызванной сферичностью Земли, равный примерно D^{-1} ;
- $\|R_g\|$: эффективный коэффициент отражения с конечным значением проводимости Земли;
- L : общая длина трассы распространения при двухскачковой траектории лучей;
- $\|R_1\|$ и $\|R_2\|$: 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 $\|R_1\|$ и $\|R_2\|$.

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, ψ , 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.

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 пространственной волной на одно-, двух- или трехскачковой трассе при высоте отражения от ионосферы, равной 70 и 90 км, что соответствует условиям распространения в дневное и ночное время. Скорость распространения полагается равной 3×10^5 км/с.

РИСУНОК 2

Углы выхода и прихода волны, ψ , и углы падения на ионосферу, i , для типичных условий распространения в дневное время ($h = 70$ км)

Пунктирная кривая отражает влияние атмосферной рефракции

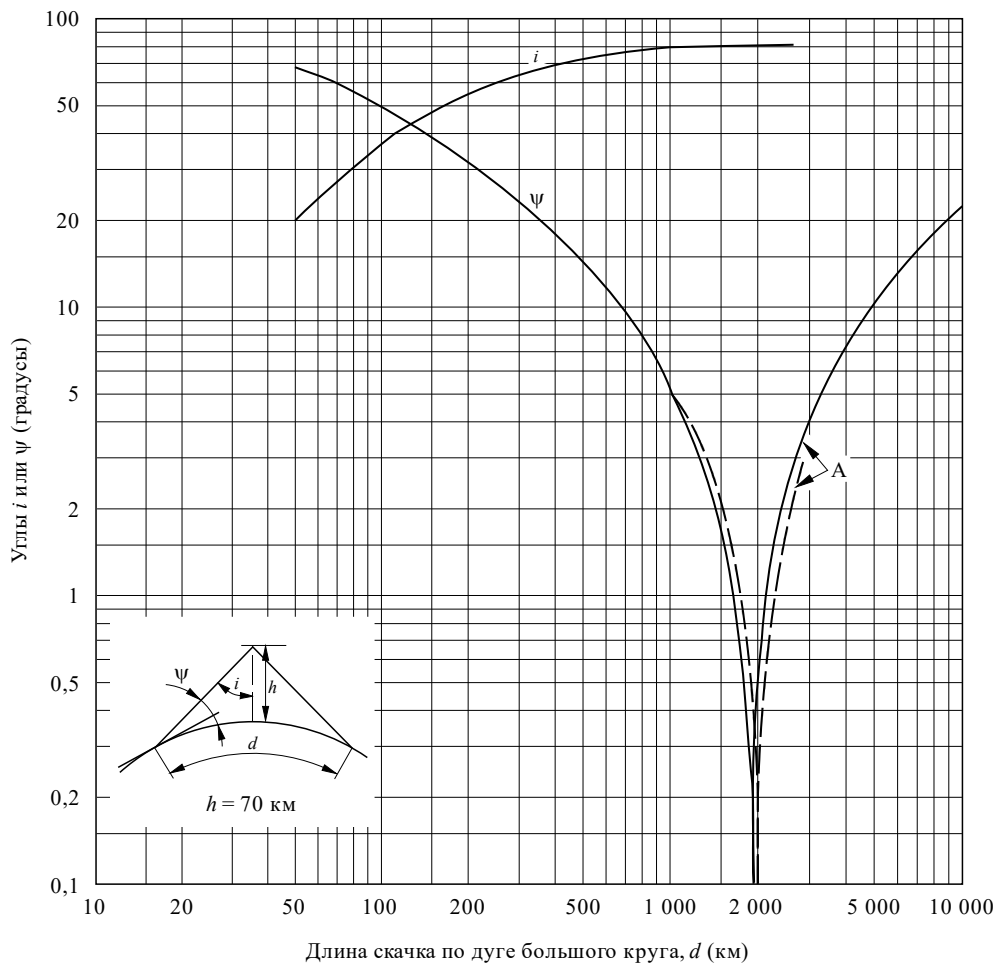
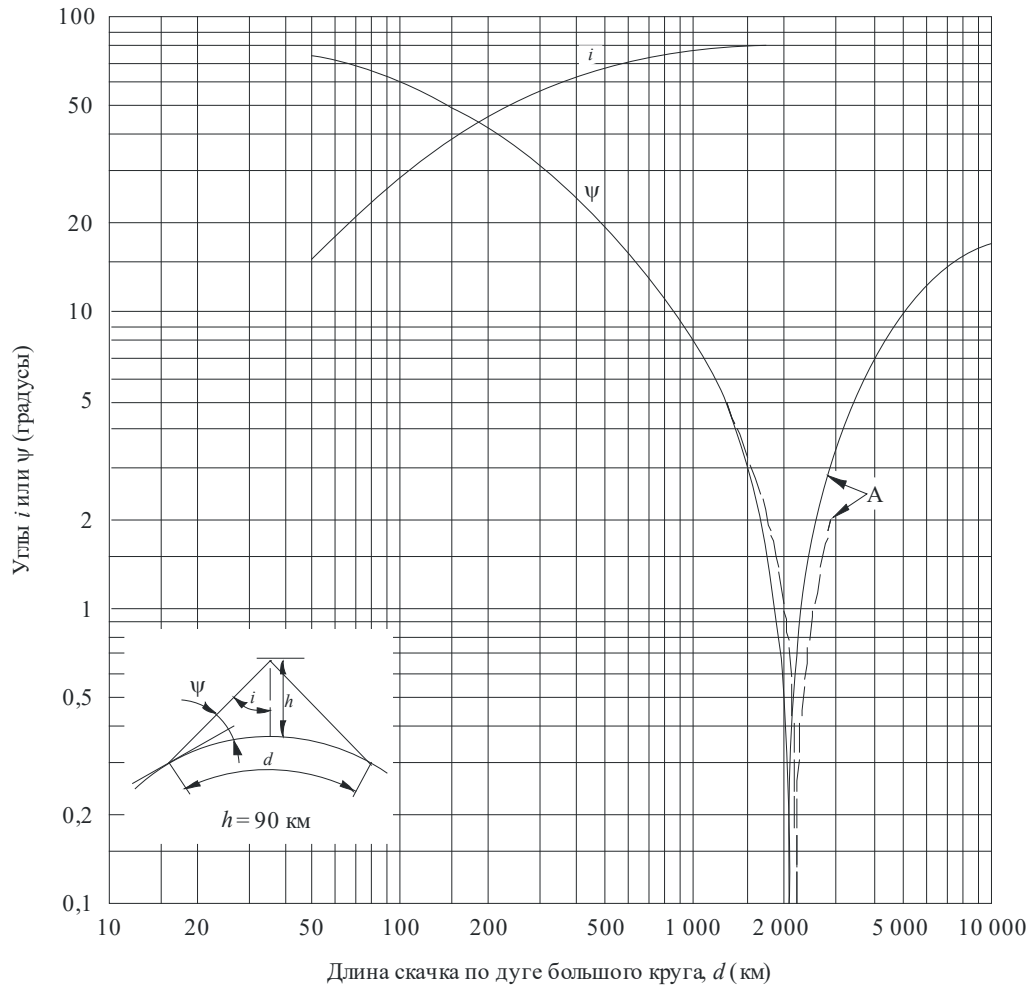


РИСУНОК 3

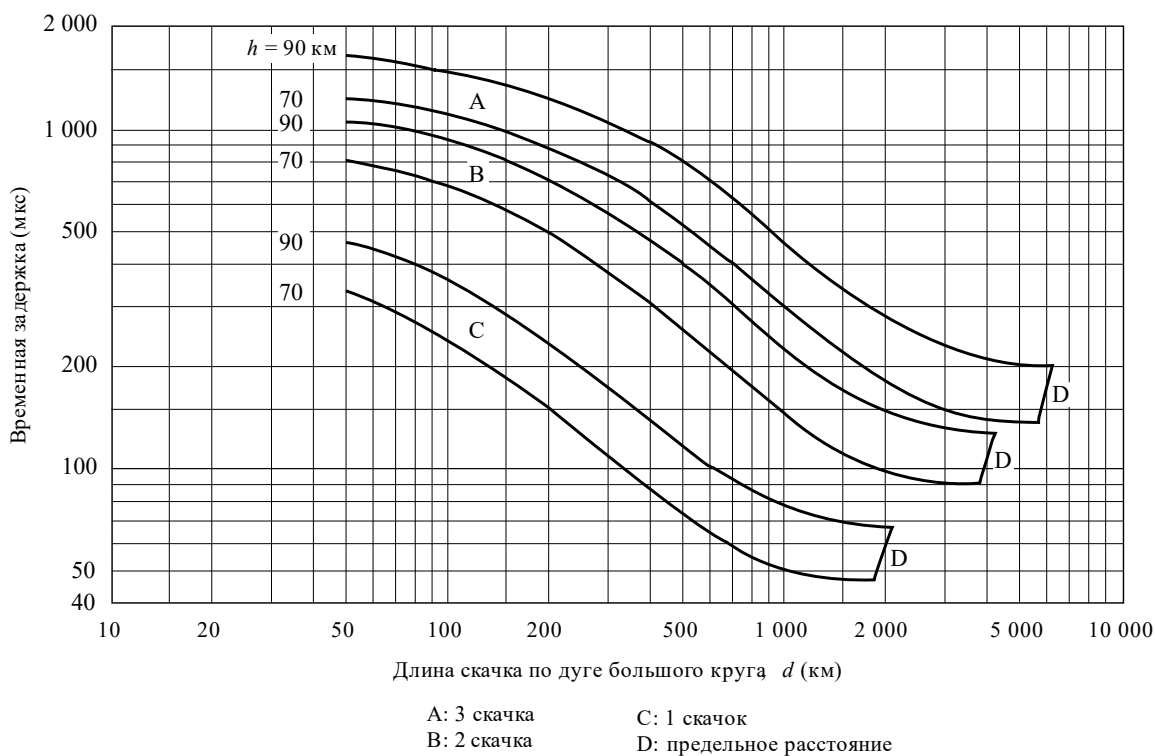
Углы выхода и прихода волны, ψ , и углы падения на ионосферу, i , для типичных условий распространения в ночное время ($h = 90$ км).
Пунктирная кривая отражает влияние атмосферной рефракции

A: отрицательные ψ

P.0684-03

РИСУНОК 4

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



P.0684-04

2.2.3 Коэффициент ионосферной фокусировки

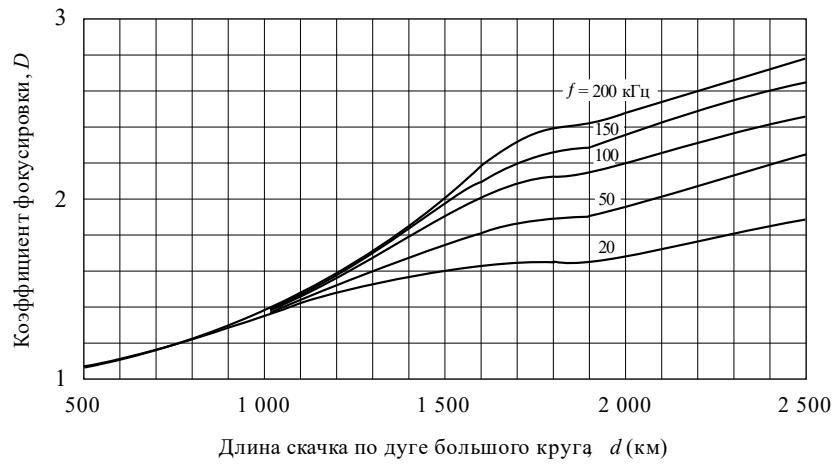
Коэффициент ионосферной фокусировки, D , для сферической Земли и ионосферы показан на рисунке 5 для дневных условий и на рисунке 6 для ночных условий.

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

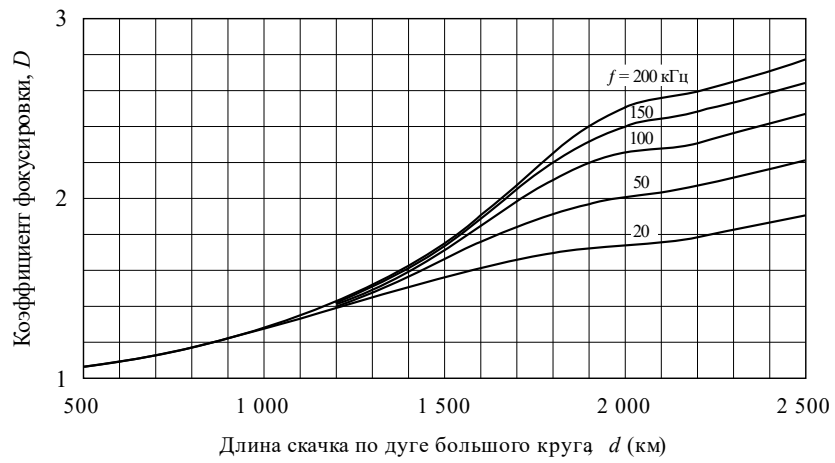
Коэффициент ионосферной фокусировки – дневное время суток



P.0684-05

РИСУНОК 6

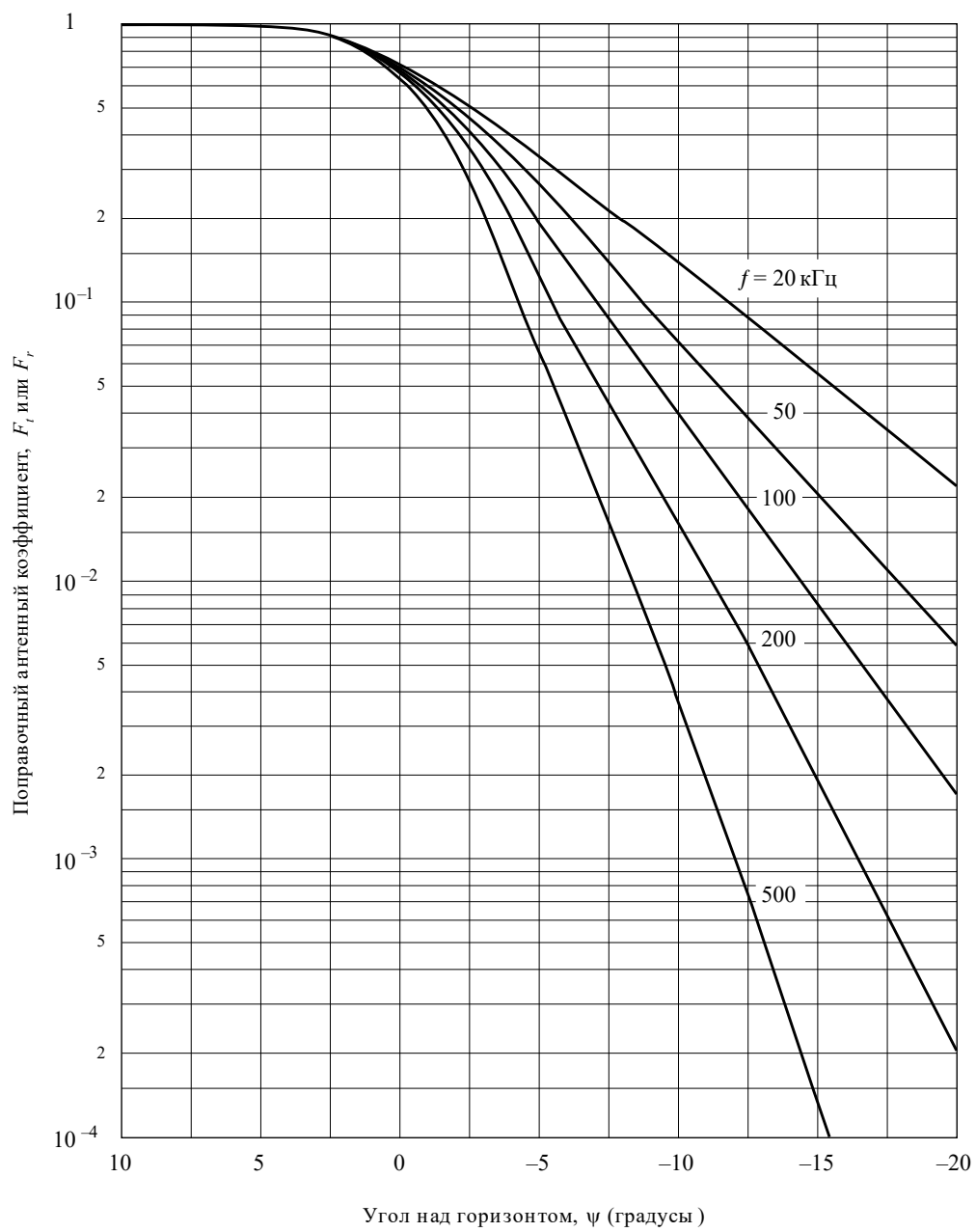
Коэффициент ионосферной фокусировки – ночное время суток



P.0684-06

РИСУНОК 7

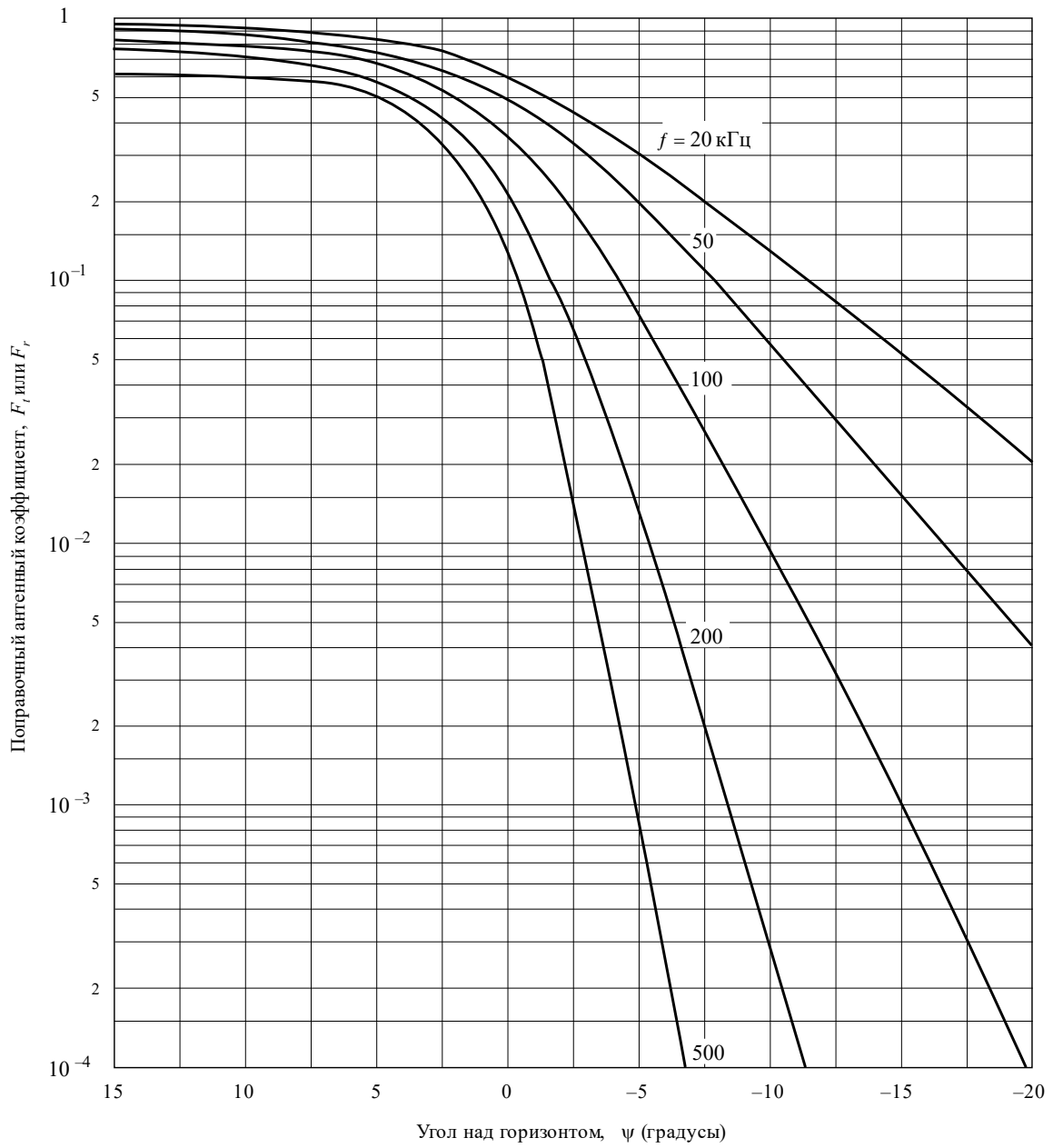
Поправочный антенный коэффициент – морская вода



$$\begin{aligned} \varepsilon &= 80 \varepsilon_0 \\ \sigma &= 5 \text{ См/м} \\ \alpha &= 4/3 \times 6360 \text{ км} \end{aligned}$$

РИСУНОК 8

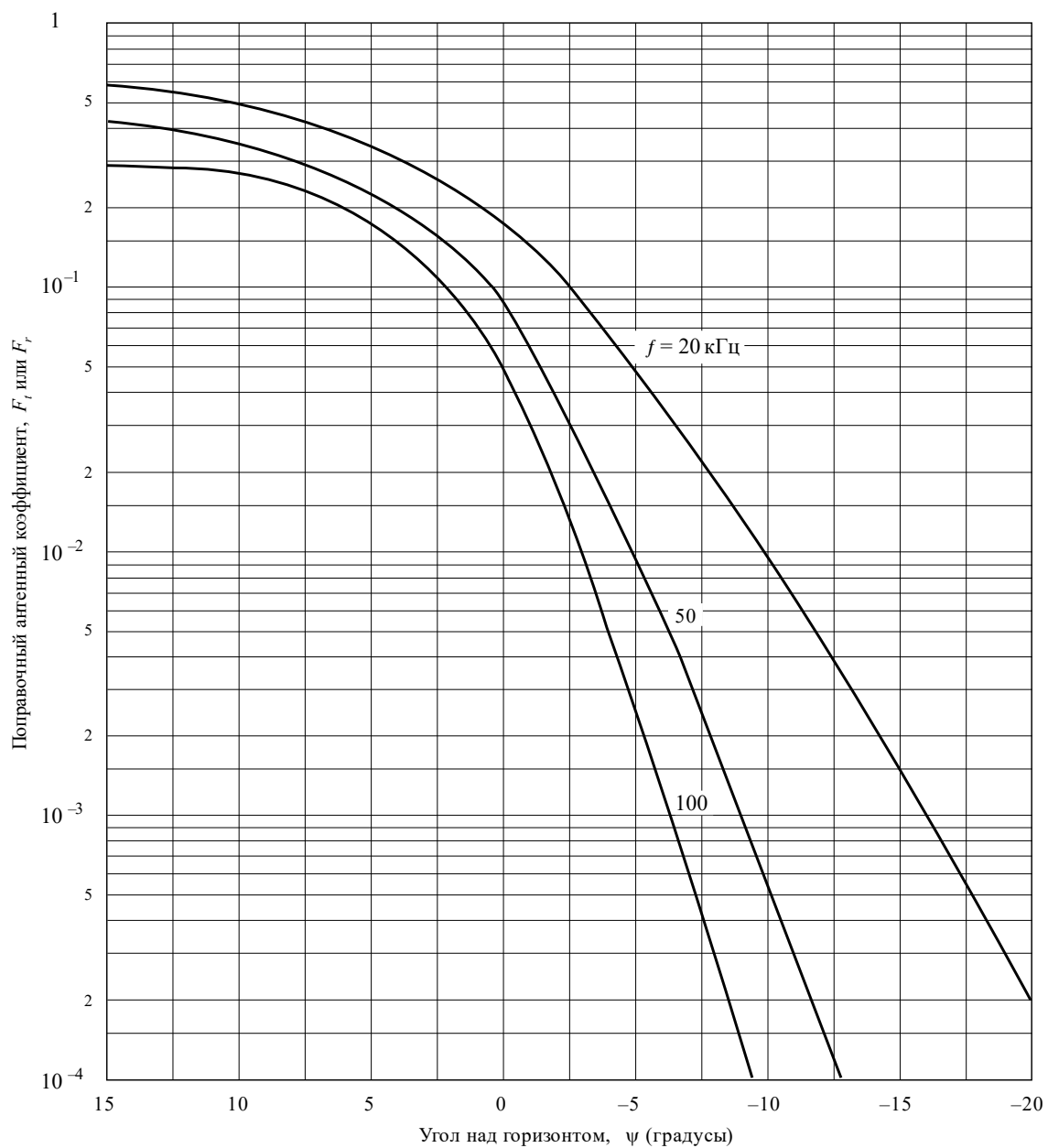
Поправочный антенный коэффициент – суша



$$\begin{aligned} \varepsilon &= 15 \varepsilon_0 \\ \sigma &= 2 \times 10^{-3} \text{ СМ/М} \\ \alpha &= 4/3 \times 6 \text{ 360 км} \end{aligned}$$

РИСУНОК 9

Поправочный антенный коэффициент – лед при температуре -4°C



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

ТАБЛИЦА 1

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

ϵ_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 ψ относятся к распространению за пределами границ применимости методов геометрической оптики для пространственной волны на односкачковой трассе (см. рисунки 1–3).

2.2.5 Коэффициенты отражения от ионосферы, $\|R\|$

На рисунке 10 показаны значения коэффициентов отражения от ионосферы $\|R\|$ для минимума солнечного цикла. Для учета изменений частоты и расстояния значения $\|R\|$ 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.

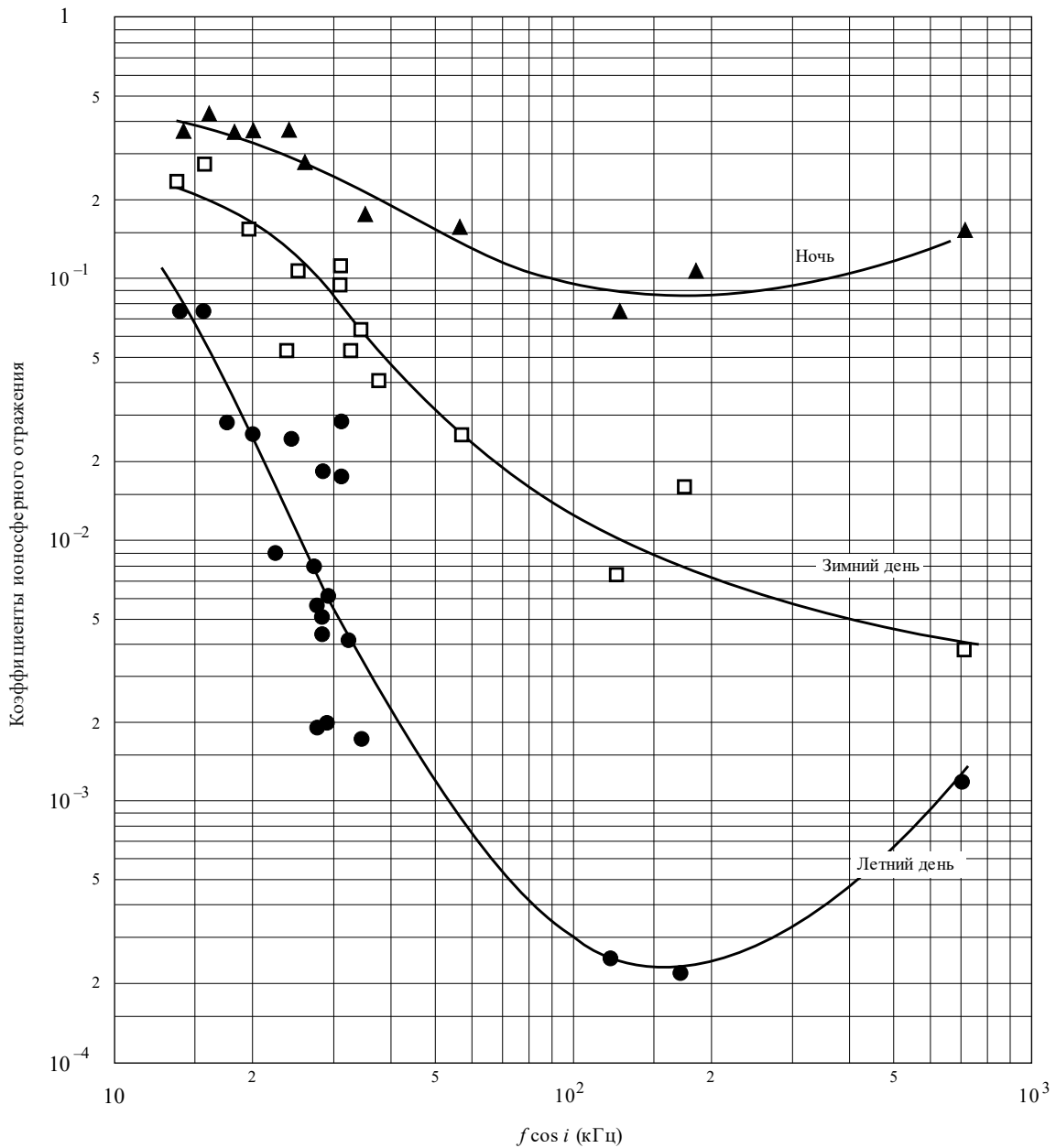
Во всех случаях данные о коэффициенте отражения от ионосферы, взятые из различных упоминавшихся источников, были при необходимости изменены для учета влияния ионосферной фокусировки, поправочных антенных коэффициентов и т. д., с тем чтобы результаты измерений соответствовали приведенной здесь методике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

Однако не всегда можно полагаться на концепцию эффективной частоты $f \cos i$, для которой коэффициенты отражения постоянны. Кривые частично 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.

Существуют колебания, зависящие от солнечного цикла, 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.

РИСУНОК 10

Коэффициенты ионосферного отражения – условия минимума солнечной активности

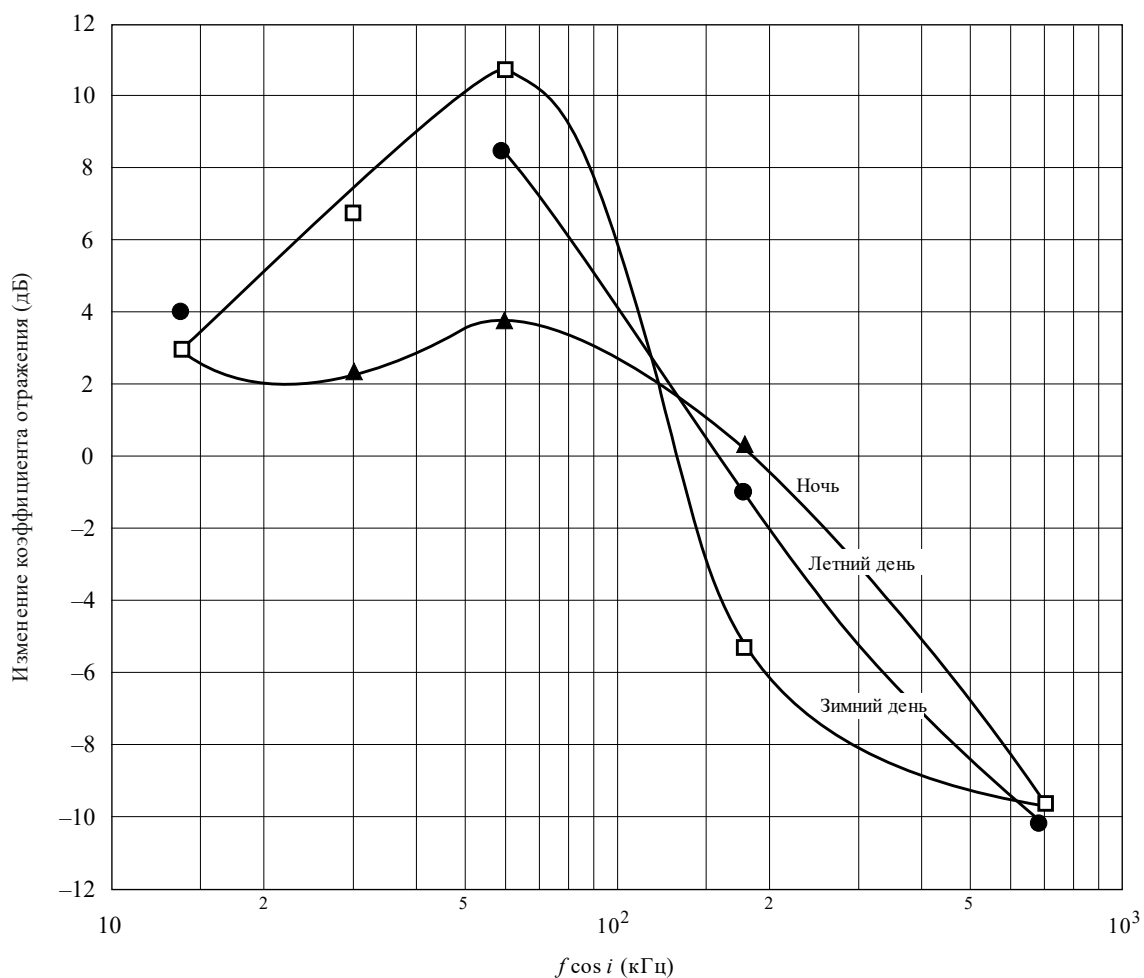


P.0684-10

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



P.0684-11

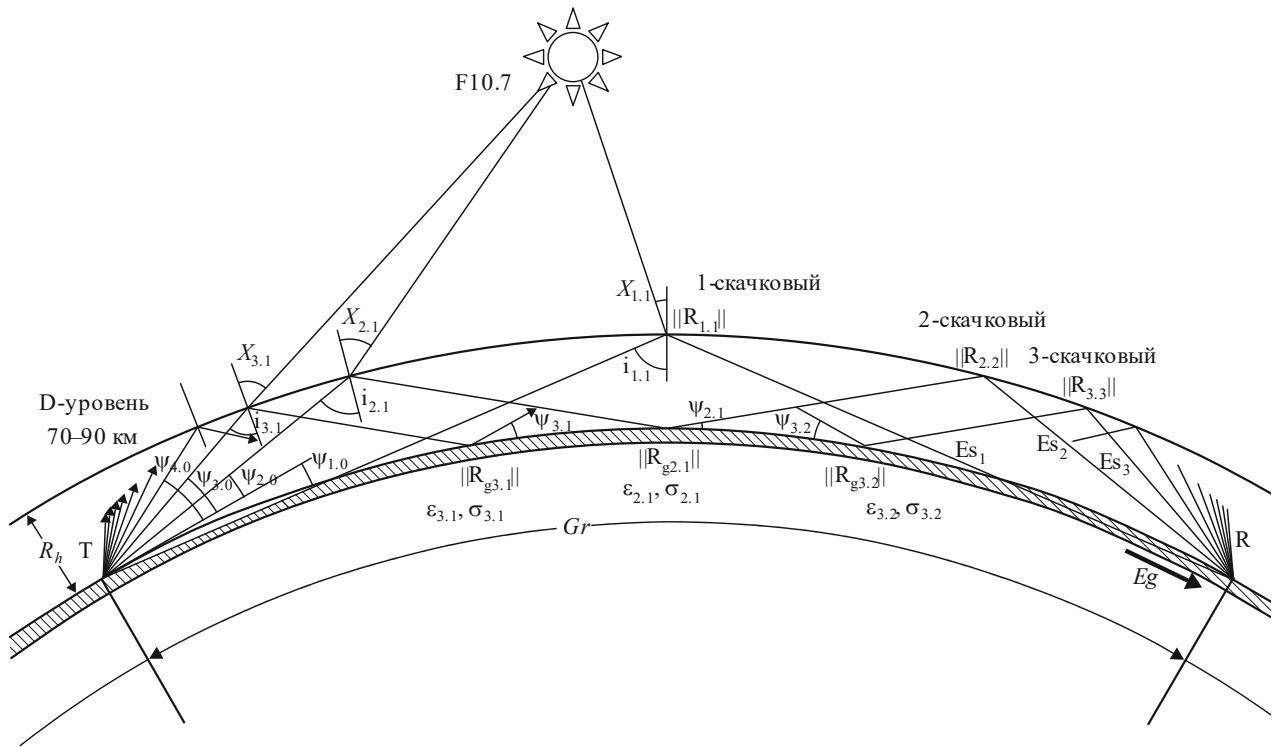
2.3 Численный метод для расчета результирующей напряженности поля и фазы

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



P.0684-12

Горизонтальная дальность Gr (км) рассчитывается следующим образом:

$$Gr = \alpha \cdot Re, \quad (6)$$

где:

α : центральный угол Земли между передатчиком и приемником (радиан);

Re : фактический радиус Земли (км).

Косинус зенитного угла солнца χ в точке (lat_m, lon_m) в данный момент времени рассчитывается следующим образом:

$$\cos \chi = \sin(lat_m) \sin \delta + \cos(lat_m) \cos \delta \cos t \quad (7)$$

где:

δ : угол склонения Солнца, который определяется формулой:

$$\delta = \beta_1 - \beta_2 \cos B + \beta_3 \sin B - \beta_4 \cos 2B + \beta_5 \sin 2B - \beta_6 \cos 3B + \beta_7 \sin 3B \quad (8)$$

$$\beta_1 = 0,006918; \beta_2 = 0,399912; \beta_3 = 0,070257; \beta_4 = 0,006758;$$

$$\beta_5 = 0,000907; \beta_6 = 0,002697; \beta_7 = 0,001480;$$

$$B = \frac{2\pi J}{365}; \quad (9)$$

J : юлианские сутки;

t : часовой угол, определяемый по формуле:

$$t = 15 \frac{\pi}{180} (TST - 12); \quad (10)$$

TST : истинное солнечное время, определяемое по формуле:

$$TST = MST + ET; \quad (11)$$

MST : среднее солнечное время, определяемое по формуле:

$$MST = GMT + \frac{lon_m}{15}; \quad (12)$$

ET : уравнение времени, определяемое следующим образом:

$$ET = \frac{12}{\pi} (\alpha_1 + \alpha_2 \cos B - \alpha_3 \sin B - \alpha_4 \cos 2B - \alpha_5 \sin 2B); \quad (13)$$

$$\alpha_1 = 0,000075; \alpha_2 = 0,001868; \alpha_3 = 0,032077; \alpha_4 = 0,014615;$$

$$\alpha_5 = 0,040849$$

Угол места Ψ вычисляется по следующему уравнению:

$$\Psi = \arctan \left(\cot \left(\frac{d}{2R_e} \right) - R_e \frac{\operatorname{cosec} \left(\frac{d}{2R_e} \right)}{R_e + h_r} \right) \quad (14)$$

где:

d : длина скачка (км);

h_r : высота точки отражения (км).

Длина радиотрассы, P (км), вычисляется по следующему уравнению:

$$P = 2R_e \sin \left(\frac{d}{2R_e} \right) \sec \left(\Psi + \frac{d}{2R_e} \right). \quad (15)$$

Угол падения, i , на ионосферу вычисляется по следующему уравнению:

$$i = \arcsin \left(\frac{R_e \cos \Psi}{R_e + h_r} \right). \quad (16)$$

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

$$\text{Время задержки} = \frac{P - d}{3 \times 10^5} \text{ (с)}. \quad (17)$$

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 ($h_{max} - y_{max}$) в полдень по местному времени.

Высота точки отражения, R_h , вычисляется следующим образом:

$$R_h = h_{max} - y_m \sqrt{1 - \frac{f - f_b}{foE}}, \quad (18)$$

где:

$$y_m = y_{mm} - \frac{(y_{mm} - y_{min})(f_{max} - foE)}{f_{max} - f_{min}} \quad (19)$$

и

$$y_{mm} = y_{max} - \frac{(y_{max} - y_{min})(fk0 - f_{max})}{f_{max} - f_{min}}. \quad (20)$$

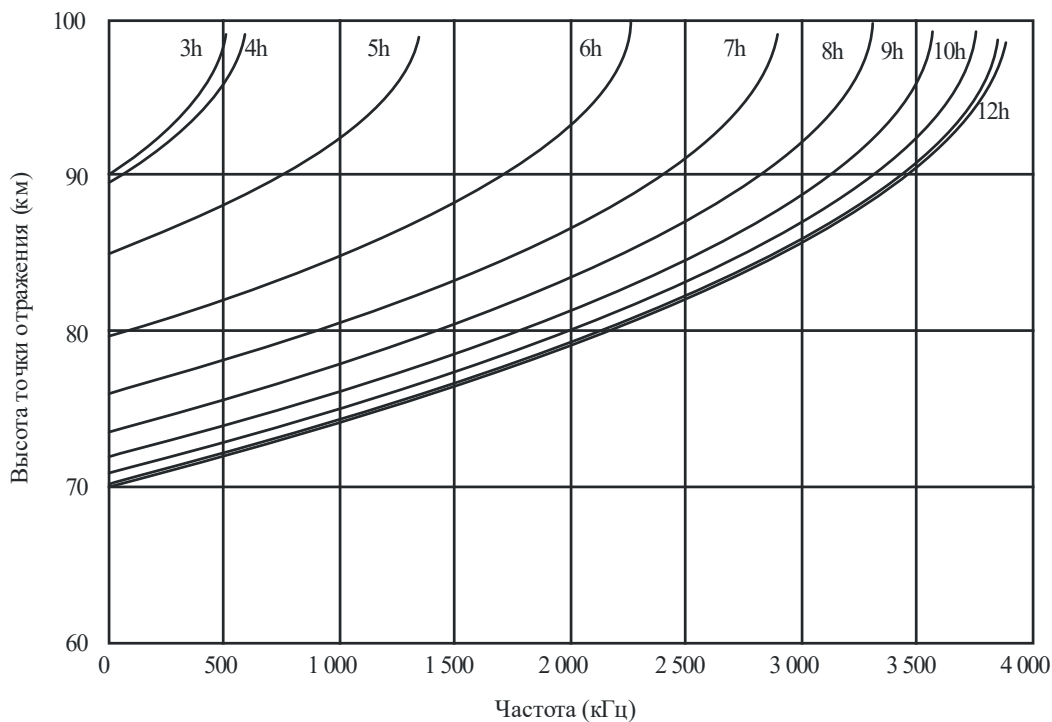
Значения $fk0$ (foE при $\chi = 0$), f_{max} (максимум foE в конкретном месте) и foE (в заданное местное время) вычисляются из данных п. 4 "Прогноз величины foE " в Рекомендации МСЭ-R P.1239.

2.3.3 Коэффициент ионосферной фокусировки

Как указано в п. 2.2.3, 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

Пример кривых $h-f$ отражающего слоя

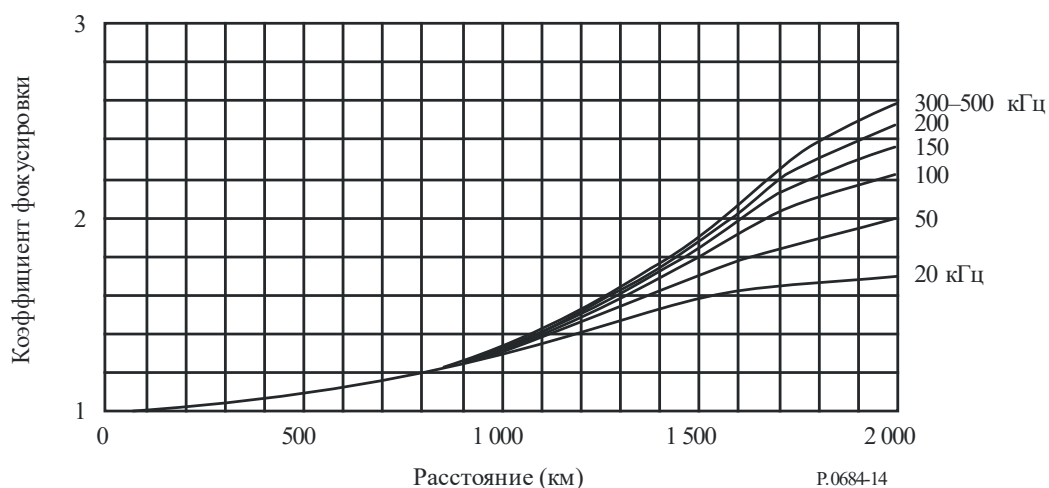


ssp: 100 июнь23 N O E
 fbase: 10 кГц umin: 10 км
 umax: 30 км hmax: 100 км

P.0684-13

РИСУНОК 14

Коэффициент ионосферной фокусировки



P.0684-14

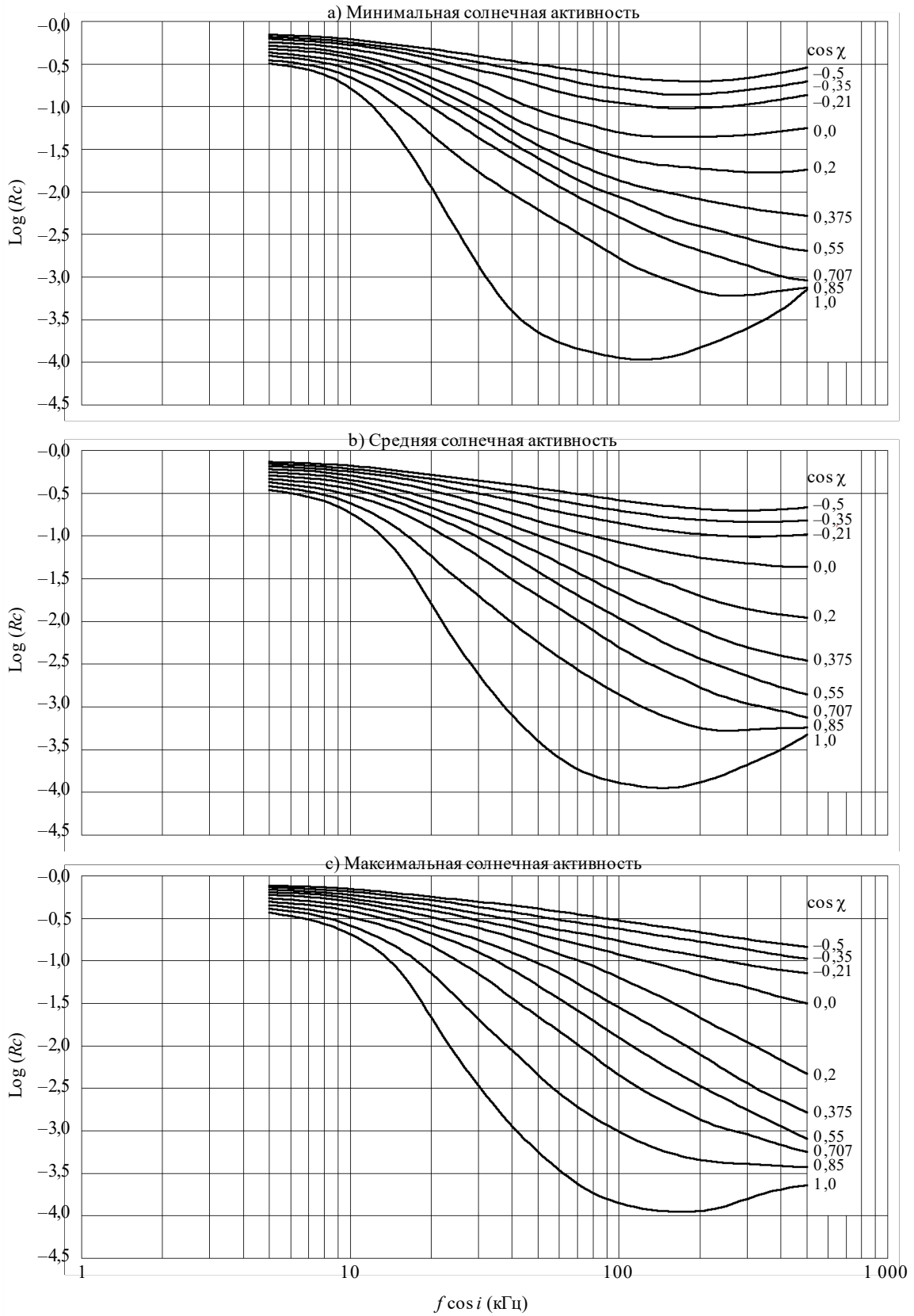
2.3.4 Поправочный коэффициент антенны

Поправочные коэффициенты передающей и приемной антенн вычисляются по кривым с интерполяцией по углу места и частоте для трех различных состояний земной поверхности, указанных в таблице 1.

2.3.5 Коэффициент ионосферного отражения

Коэффициенты ионосферного отражения, приведенные в п. 2.2, преобразуются в соответствующие коэффициенты для трех периодов солнечной активности при индексе F10.7 максимальной активности ($F10.7 > 120$), средней активности ($120 \geq F10.7 > 65$) и минимальной активности ($F10.7 \leq 65$). Эти коэффициенты показаны как функция $f \cos i$ и $\cos \chi$ для максимальной, средней и минимальной солнечной активности, как показано на рисунке 15. Коэффициенты ионосферного отражения в данных условиях получаются путем интерполяции $\|R\|$ в отношении значений $f \cos i$ и $\cos \chi$.

РИСУНОК 15
Ионосферный коэффициент отражения



2.3.6 Потери на отражение от поверхности земли

Коэффициент отражения от поверхности земли, $\|Rg\|$, для вертикальной поляризации вычисляется как функция частоты f (кГц), угла места Ψ , диэлектрической постоянной ε и проводимости почвы σ для положительного угла места.

$$\|Rg\|(\Psi > 0) = \frac{n^2 \sin \Psi - \sqrt{n^2 - \cos^2 \Psi}}{n^2 \sin \Psi + \sqrt{n^2 - \cos^2 \Psi}} \quad (21)$$

где:

$$n^2 = \varepsilon - j \frac{18\sigma \times 10^6}{f}. \quad (22)$$

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

Для отрицательных углов места учитываются дифракционные потери. Коэффициент отражения от поверхности земли является отношением значения напряженности поля при дифракции, которое рассчитано программой LFMF-SmoothEarth, см. Рекомендацию МСЭ-R P.368, к значению напряженности поля при распространении в свободном пространстве.

$$\|Rg\|(\Psi \leq 0) = \frac{E(\text{при дифракции})}{E(\text{в свободном пространстве})} \quad (23)$$

2.3.7 Напряженность поля пространственной волны

Если прием производится на небольшую рамочную антенну, расположенную на поверхности Земли, то эффективная напряженность поля M -скачковой моды пространственной волны, E_{SM} определяется следующим образом:

$$E_{SM} = \frac{600\sqrt{Pt} \cos(\Psi_M) \prod_{N=1}^M \|R_{M,N}\| \prod_{N=1}^{M-1} \|Rg_{M,N}\|}{L_M} D_M F_{tM} F_{rM} \exp(-jkL_M) \text{ мВ/м}, \quad (24)$$

где:

- Pt : излучаемая мощность (кВт);
- Ψ_M : угол выхода и прихода пространственной волны у поверхности земли, относительно горизонтали;
- $\|R_{M,N}\|$: коэффициент ионосферного отражения в N -й точке отражения;
- $\|Rg_{M,N}\|$: коэффициент отражения от поверхности земли в N -й точке отражения;
- D_M : коэффициент ионосферной фокусировки;
- F_c : коэффициент ионосферной фокусировки;
- F_{tM} и F_{rM} : поправочный коэффициент передающей и приемной антенны, соответственно;
- L_M : длина трассы пространственной волны, определяемая по формуле.

$$L_M = \sum_{N=1}^M P_{M,N}. \quad (25)$$

2.3.8 Земная волна

Напряженность поля земной волны $|Eg|$ рассчитывается с использованием программы LFMF-SmoothEarth, см. Рекомендацию МСЭ-R P.368-10.

$$Eg = |Eg| \exp(-jkGr). \quad (26)$$

Кроме того, кривые распространения земных волн подбираются из Рекомендации МСЭ-R P.368 для трех состояний земной поверхности, которые приведены в таблице 1. Затем напряженность поля земной волны вычисляется путем интерполяции как по расстоянию, так и по частоте.

Состояния земной поверхности приведены на рисунке 43 "Временная карта проводимости почвы на СЧ" в Рекомендации МСЭ-R P.832-2.

2.3.9 Результирующая напряженность поля и фаза

Результирующее электрическое поля рассчитывается путем векторного суммирования земной волны и пространственных волн по следующему уравнению:

$$E = E_g + \sum_{M=1}^{10} E_{S_M} . \quad (27)$$

Достаточная точность достигается, если число скачком (M) берется равным 10.

Напряженность поля и фаза в точке приема составляют $|E| \arg(E)$, соответственно.

2.4 Прогнозирование для трасс распространения, превышающих 4000 км

Представленные ниже уравнения применяются для расчета напряженности электрического поля на расстоянии до 16 000 км. Медианное значение напряженности электрического поля компонента пространственной волны на K -скачковой трассе E_{S_K} (мВ/м) равно:

$$E_{S_K} = \frac{600\sqrt{p_l} \cos \Psi_K \left(\prod_{L=1}^K R_{C_{K,L}} \right) F_{C_K} R_{g_K}^{K-1} F_{t_K} F_{r_K}}{\sum_{L=1}^K P_{l_{K,L}}} \exp \left(-jk \sum_{L=1}^K P_{l_{K,L}} \right) \quad (28)$$

где:

- K : номер скачка, от 1 до 10;
- L : номер верхней точки, от 1 до K ;
- k : номер волны;
- p_l : излучаемая мощность (кВт);
- Ψ_K : углы выхода и прихода K -скачкового луча;
- $R_{C_{K,L}}$: коэффициенты ионосферного отражения для периодов минимальных, средних и максимальных солнечных пятен, как это показано на рисунках 15а), 15б) и 15с), соответственно;
- F_{C_K} : коэффициент фокусировки, полученный на основе рисунка 14;
- R_{g_K} : коэффициент отражения от почвы для вертикально поляризованной волны, полученный из уравнений (21) и (22);
- F_{t_K} и F_{r_K} : поправочные коэффициенты передающей и приемной антенн, соответственно, полученные на основе рисунков 7, 8 и 9;
- $P_{l_{K,L}}$: дальность распространения L -го отражения K -скачкового луча.

Результирующее поле, E_s , представляет собой сумму векторов десяти пространственных волн и земной волны и определяется следующим образом:

$$E_s = |E_g| \exp(-jkd) + \sum_{K=1}^{10} E_{S_K} , \quad (29)$$

где:

$|Eg|$: напряженность поля земной волны, полученная из Рекомендации МСЭ-R P.368 (см. п. 2.3.8);

d : расстояние по дуге большого круга между передающей и приемной станциями, в км.

Значение эффективной напряженности поля, получаемой рамочной антенной, приводится как $|Es|$.

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 (θ), 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):

$$F(\theta) = |R_d(\theta) \bar{R}_d(\theta) - 1| = 0, \quad (30)$$

где:

$$R_d(\theta) = \begin{bmatrix} \parallel R_{\parallel d}(\theta) & \perp R_{\parallel d}(\theta) \\ \parallel R_{\perp d}(\theta) & \perp R_{\perp d}(\theta) \end{bmatrix} \quad (31)$$

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

$$\bar{R}_d(\theta) = \begin{bmatrix} \parallel \bar{R}_{\parallel d}(\theta) & 0 \\ 0 & \perp \bar{R}_{\perp d}(\theta) \end{bmatrix} \quad (32)$$

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 (31) и (32) 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;

- $\|R_{\perp}$: отношение отраженного поля, перпендикулярного плоскости падения, к падающему полю в плоскости падения;
- ${}_{\perp}R\|$: отношение отраженного поля в плоскости падения к падающему полю, перпендикулярному плоскости падения.

Матрица ионосферного отражения, R_d (уравнение (31)) 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 (30), решается для желаемого количества мод (собственных углов, θ_n). Для набора полученных таким образом значений θ 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.

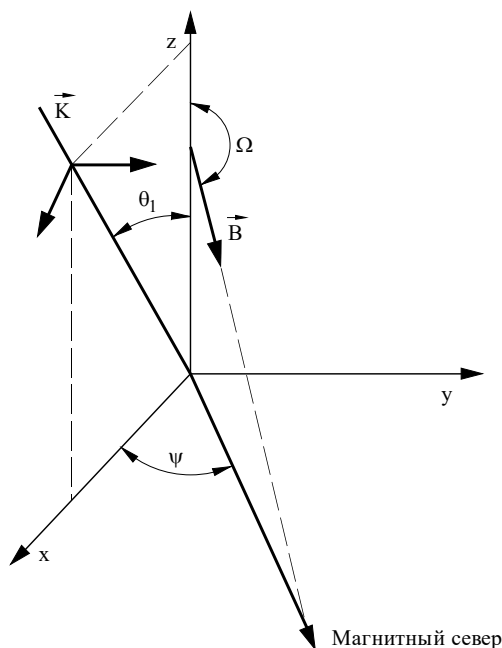
Выбираемая система координат такова, что направление z считается положительным в сторону ионосферы. Положительное значение x совпадает с направлением распространения, а ось y перпендикулярна к плоскости распространения.

Соответствующая геометрия приведена на рисунке 16, где показана плоская волна, падающая на ионосферу снизу, с волновым вектором \mathbf{K} в плоскости x - z (плоскость падения) под углом θ_1 к вертикали (ось z). Другими переменными, приведенными на рисунке, являются Ω – угол геомагнитного поля, измеренный от вертикали ($90^\circ < \Omega \leq 180^\circ$ для северного полушария), и ψ – азимут распространения (к востоку от магнитного севера). Вектор \mathbf{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 (30). 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 16
Геометрия распространения волны



P.0684-16

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

Матрица коэффициента отражения от поверхности земли, \bar{R}_d , приведенная в уравнении (32), определяется через независимые решения h_1 и h_2 уравнения Стокса:

$$\frac{d^2 h_{1,2}}{dz^2} + z h_{1,2} = 0 \quad (33)$$

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 (30) для собственных углов θ_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 (θ_n). С его помощью можно также определить единственную моду, необходимую для распространения КНЧ. Процедура основана на теории функций комплексной переменной. Модальное уравнение (30) решается для всех важных собственных углов, θ_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 θ_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 θ_0 , т. е. θ_0 – это нуль уравнения $F(\theta) = 0$.

Пусть:

$$F(\theta) = F_R(\theta_r, \theta_i) + j F_I(\theta_r, \theta_i) = \operatorname{Re}(F) + j \operatorname{Im}(F), \quad (34)$$

где:

$$\theta = \theta_r + j \theta_i. \quad (35)$$

Также:

$$F(\theta) = \left[(F_R(\theta_r, \theta_i))^2 + (F_I(\theta_r, \theta_i))^2 \right]^{1/2} e^{j\varphi} \quad (36)$$

где:

$$\varphi = \operatorname{tg}^{-1} \left[\frac{F_I(\theta_r, \theta_i)}{F_R(\theta_r, \theta_i)} \right] \quad (37)$$

и:

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

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

θ_r : реальная часть комплексного угла θ ;

θ_i : мнимая часть комплексного угла θ .

Из уравнения (37) следует, что если:

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

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

Также если:

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

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

Это ведет к фазовой диаграмме, представленной на рисунке 17. Семейство линий постоянной фазы, которые называются фазовыми контурами в диапазоне от 0 до 2π радиан, выходят по радиусу (сплошные линии) из простого нуля. Пунктирные линии отражают поведение возможных фазовых контуров в области за пределами окрестности θ_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 18. 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° и 180° в направлении против часовой стрелки. Подойдет любой фазовый контур; вместе с тем фазовые контуры 0° и 180° выбираются потому, что математически их легко обнаружить при $\operatorname{Im}(F) = 0$. 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° или 180° (точки А, D и G). Как только найден один из этих фазовых контуров, поиск границ временно прекращается, пока не будет прослежен фазовый контур 0° или 180° 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 В и Е), 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° (см. рисунок 17), пока вновь не достигается граница прямоугольника поиска (точки С и F). Если фазовый контур существует, граница поиска, такая как точка С, 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 С, F или H) поиск фазового контура прекращается и возобновляется поиск границ в точке, где последний раз встречалась фазовая линия 0° или 180° (например, точки А, D или G). Когда все границы прямоугольника поиска исследованы, все нули функции $F(\theta)$, расположенные внутри него, должны быть найдены.

РИСУНОК 17



P.0684-17

Положение нуля хорошо видно из пересечения фазовых контуров (см. рисунок 17). Следовательно, пересечение фазовых контуров 0° или 180° с любым другим фазовым контуром определяет положение нуля функции $F(\theta)$. Другие фазовые контуры, используемые для этой цели, – это контур 90° или 270° , также выбранный из соображений простоты, поскольку эти контуры легко распознаются и соответствуют $\text{Re}(F) = 0$. Пока прослеживается фазовый контур 0° или 180° , 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° или 270° 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.

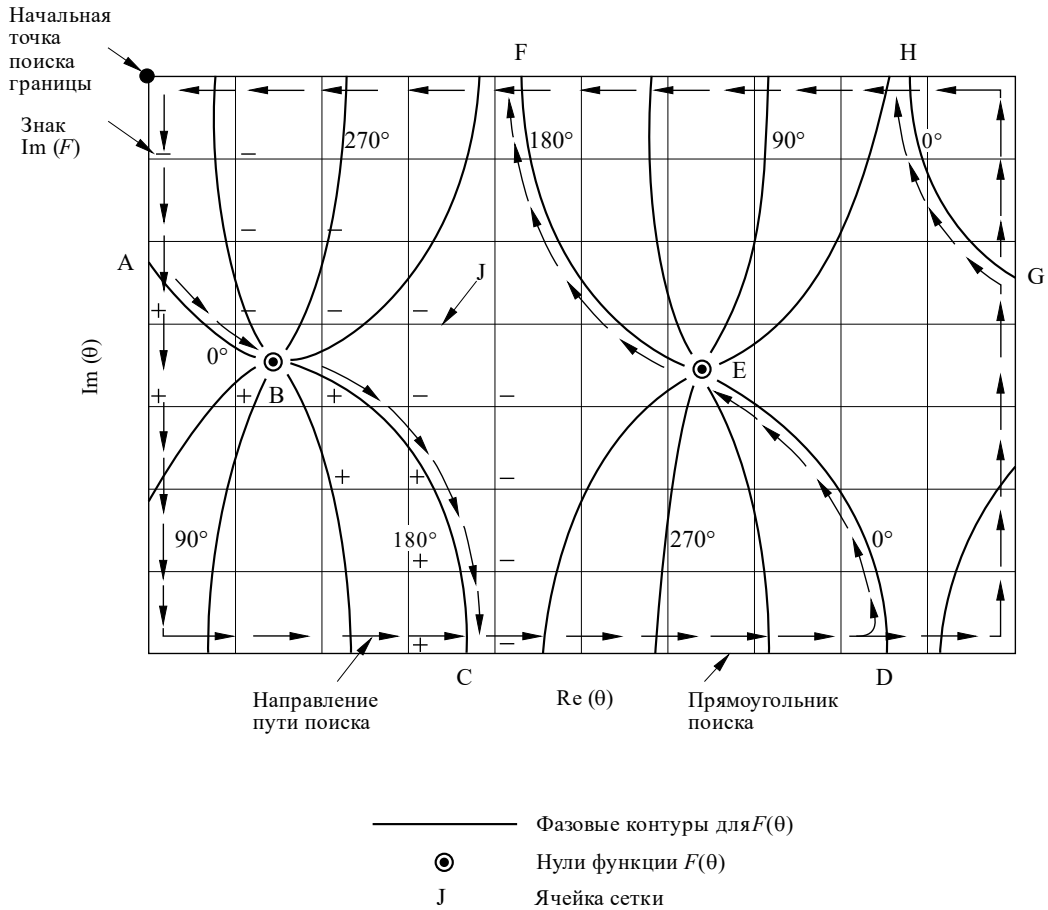
В процедуре Ньютона-Рафсона в качестве начального решения θ_0 уравнения (30), где $F(\theta) = 0$, используется каждое значение собственного угла, θ_n , полученное из сетки "MODESRCH". Затем находится новое значение функции для $\theta_0 + \delta \theta$, а поправка для θ_0 определяется с помощью уравнения:

$$\Delta\theta = \frac{F(\theta_0) \delta \theta}{F(\theta_0 + \delta \theta) - F(\theta_0)} \quad (38)$$

Затем поправка, определенная с помощью уравнения (38), 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.

РИСУНОК 18

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



P.0684-18

4 Расчет напряженности поля

4.1 Необходимые параметры

Когда известны собственные углы, θ_n , легко рассчитать следующие величины, представляющие физический интерес.

Фазовая скорость на земле:

$$V = \frac{c}{K(\sin \theta_n)_r} \quad (39)$$

$$\text{Постоянная затухания на уровне земли (дБ/Мм): } \Gamma = -8,6859 k K (\sin \theta_n)_i, \quad (40)$$

где:

Скорость света в вакууме:

$$c = 2,997928 \times 10^5 \text{ км/с.}$$

$$K = \left(1 + \frac{\alpha h}{2} \right) \quad (41)$$

$$\alpha = 2 / a = 3,14 \times 10^{-4} / \text{ км} \quad (42)$$

В соответствии с геометрией, представленной на рисунке 16, 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 θ – 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 ω – 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 (λ_V), торцом горизонтального диполя (λ_E) и горизонтальным диполем поперечного излучения (λ_B).

ТАБЛИЦА 2

Коэффициенты возбуждения

Компонента поля	E_z	E_y	E_x
Возбудитель			
λ_V	$B_1 \frac{(1 + \bar{R}_{\parallel})^2 (1 - \bar{R}_{\perp} R_{\perp})}{\bar{R}_{\parallel} D_{11}}$	$\frac{-B_1}{S} \frac{\bar{R}_{\perp} (1 + \bar{R}_{\parallel}) (1 + \bar{R}_{\perp})}{D_{12}}$	$\frac{B_1}{S} \frac{(1 + \bar{R}_{\parallel})^2 (1 - \bar{R}_{\perp} R_{\perp})}{\bar{R}_{\parallel} D_{11}}$
λ_E	$B_2 \frac{(1 + \bar{R}_{\parallel})^2 (1 - \bar{R}_{\perp} R_{\perp})}{\bar{R}_{\parallel} D_{11}}$	$\frac{-B_2}{S} \frac{\bar{R}_{\perp} (1 + \bar{R}_{\parallel}) (1 + \bar{R}_{\perp})}{D_{12}}$	$\frac{B_2}{S} \frac{(1 + \bar{R}_{\parallel})^2 (1 - \bar{R}_{\perp} R_{\perp})}{\bar{R}_{\parallel} D_{11}}$
λ_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:

$$B_1 = \frac{S^{5/2}}{\frac{\partial F}{\partial \theta} \Big|_{\theta = \theta_n}} \quad B_2 = -\frac{B_1}{S} \quad (43)$$

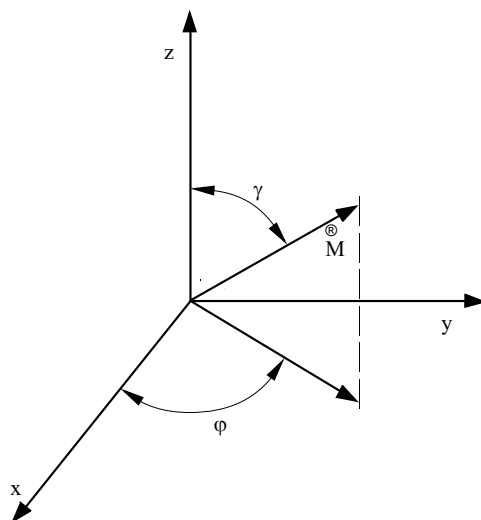
где S – синус собственного угла, а знаменатель представляет собой производную модального уравнения при собственном угле, θ_n .

Коэффициенты возбуждения должны быть дополнены значениями выигрыша за счет высоты.

Напряженность поля можно рассчитать для возбудителей 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 19 показана ориентация диполя относительно геометрии распространения, при которой ось z всегда перпендикулярна к искривленной поверхности Земли. Углы γ и φ характеризуют ориентацию передатчика относительно координатной системы x, y, z .

РИСУНОК 19

Ориентация диполя \vec{M} внутри волновода, где γ – наклонение, а φ – азимутальная ориентация



P.0684-19

Из рисунка 19 видно, что $\gamma = 0^\circ$ соответствует возбуждению от вертикального диполя, а $\gamma = 90^\circ$ – возбуждению от горизонтального диполя. φ 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:

$$\left(\lambda \frac{T}{V} = \lambda \frac{R}{V}\right), \left(\lambda \frac{T}{B} = \lambda \frac{R}{B}\right) \text{ и } \left(\lambda \frac{T}{E} = \lambda \frac{R}{E}\right), \quad \text{а также } \left(\bar{S} \frac{T}{n} = \bar{S} \frac{R}{n}\right) \quad (44)$$

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.

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 20. 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:

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

$$= \sum_{j=1}^j a_{jk}^{p+1} \left[-i k S_j^{p+1} (x_p - x_{p+1}) \right] I_{n,k}^{p,p+1} \quad \text{при } 1 \leq p < NTR - 1,$$
(45)

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.

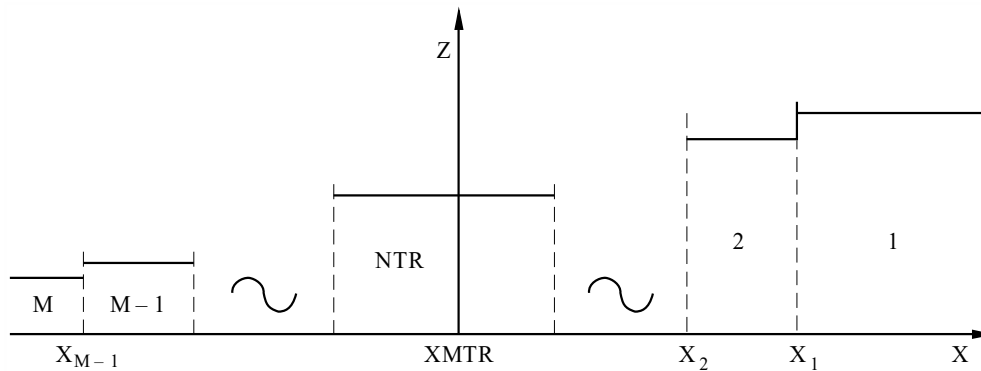
Критическим моментом при решении системы уравнений (45) является оценка интеграла:

$$I_{j,k}^{m,p} = \int_{-\infty}^{\infty} A_j^{mt} \cdot G_k^p dz \quad (46)$$

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 20
Модель преобразования мод



P.068420

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, располагающихся 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, ω_r , которая зависит от высоты Z . Этот параметр описывается выражением:

$$\omega_r(Z) = \frac{\omega_p^2(Z)}{\nu(Z)} = \frac{q^2}{\epsilon_0} \left[\frac{N_e(Z)}{m_e \nu_e(Z)} + \frac{N_+(Z)}{m_+ \nu_+(Z)} + \frac{N_-(Z)}{m_- \nu_-(Z)} \right], \quad (47)$$

где:

$\omega_p(Z)$: плазменная частота;

q : заряд электрона;

ϵ_0 : диэлектрическая проницаемость свободного пространства;

ν_e : частота столкновений электронов с нейтральными частицами (c^{-1});

ν_+ : частота столкновений положительных ионов с нейтральными частицами (c^{-1});

ν_- : частота столкновений отрицательных ионов с нейтральными частицами (c^{-1});

N_e : концентрация электронов (cm^{-3});

N_+ : концентрация положительных ионов (cm^{-3});

- N_- : концентрация отрицательных ионов (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:

$$\omega_r(Z) = \omega_0 \exp[\beta(Z - H')], \quad (48)$$

где:

- β : 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 β (км^{-1}) и H' (км).

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

$$N(Z) = \{1,43 \times 10^7 \times \exp(-0,15 H')\} \{\exp(\beta - 0,15)(Z - H')\} \quad \text{эл}/\text{см}^3 \quad (49)$$

Профиль частоты столкновений, используемый для расчета, имеет вид:

$$v(Z) = v_0 \exp(-\alpha Z), \quad (50)$$

где:

- Z : высота (км);
 v_0 : $1,82 \times 10^{11}$ столкновений/с;
 α : $0,15 \text{ км}^{-1}$.

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

$$\omega_r(Z) = 2,5 \times 10^5 \exp[\beta(Z - H')] \quad (51)$$

Несомненная польза такой модели ионосферы объясняется простотой ее применения и успешным моделированием с ее помощью экспериментальных данных измерений. Значения параметров β 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 β 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, χ	β	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	$D < 70$

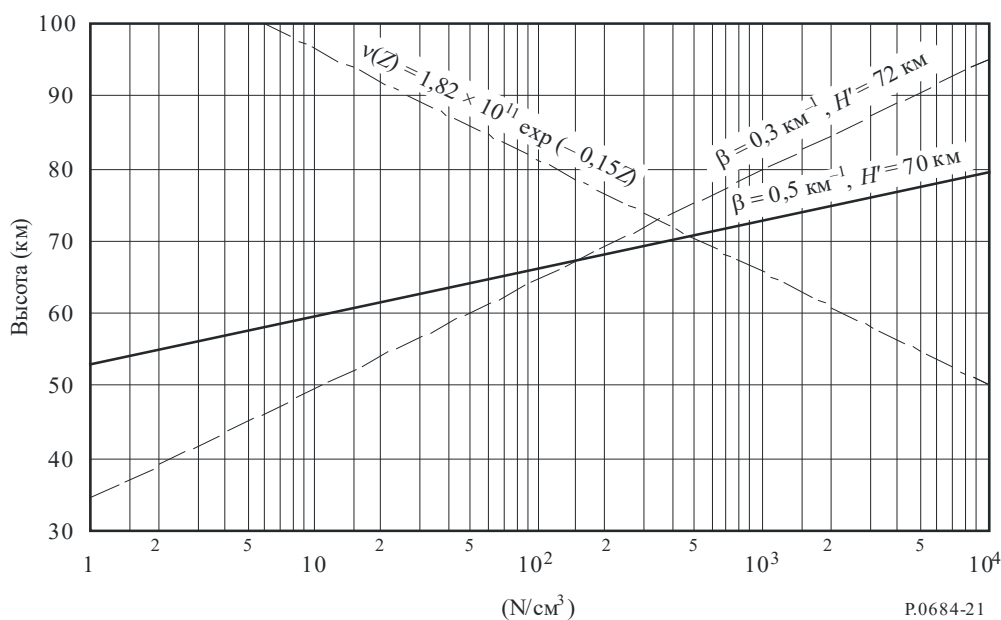
На рисунке 21 показаны характерные соотношения в зависимости от некоторых экспоненциальных профилей для дневных условий, а на рисунке 22 – для ночных.

Профили концентрации электронов и ионов, предложенные для распространения волн в диапазоне КНЧ, показаны на рисунке 23.

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

РИСУНОК 21

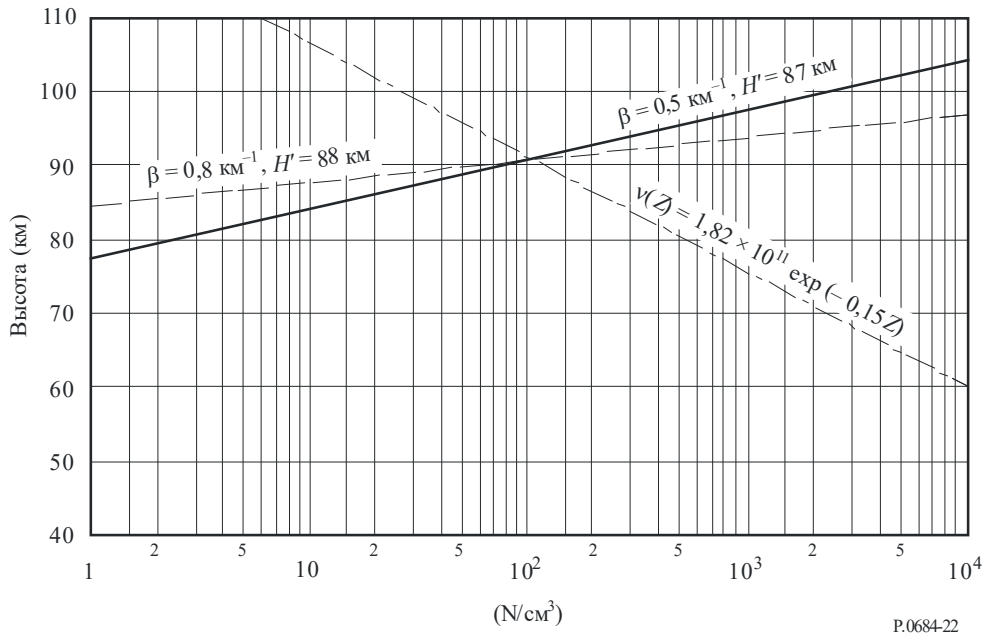
Дневные профили концентрации электронов и профиль частоты столкновений



P.0684-21

РИСУНОК 22

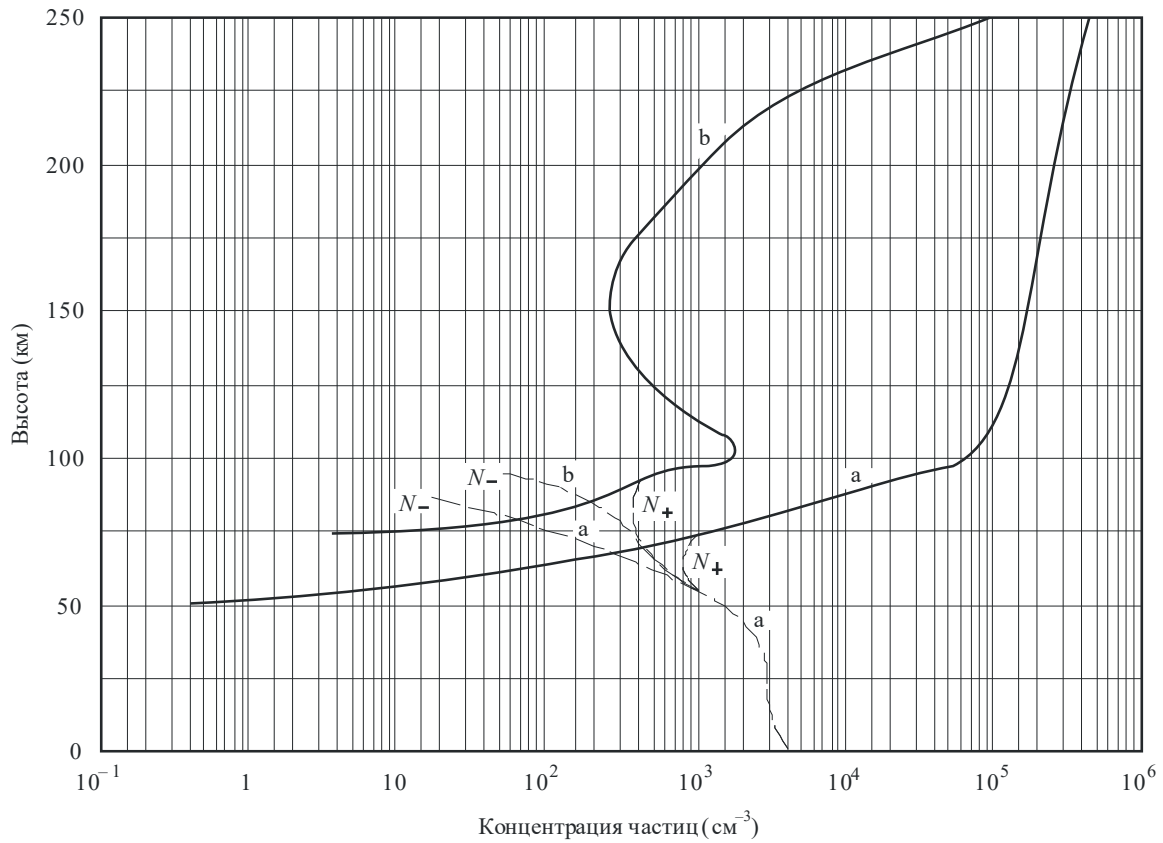
Ночные профили концентрации электронов и профиль частоты столкновений



P.0684-22

РИСУНОК 23

Дневные и ночные профили различных элементов окружающей среды



- Электроны
- - - - - Ионы
- a: день
- b: ночь

P.0684-23

ТАБЛИЦА 4

**Частота столкновений электронов и ионов в ионосфере в с⁻¹
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⁻¹
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 WKВ-модели или преобразования мод.

Комплексная относительная диэлектрическая проницаемость Земли, N_g , определяется как:

$$N_g = \varepsilon / \varepsilon_0 - i \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0}, \quad (52)$$

где:

- σ : проводимость почвы;
- $\varepsilon/\varepsilon_0$: относительная диэлектрическая проницаемость почвы;
- ε_0 : диэлектрическая проницаемость свободного пространства;
- ω : 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	$d = 1\,911$ км
Частота	$f = 80$ кГц
Характеристики места расположения передатчика на земле	$\left\{ \begin{array}{l} \sigma = 2 \times 10^{-3} \text{ См/м} \\ \varepsilon = 15 \varepsilon_0 \end{array} \right.$
Характеристики места расположения приемника на море	$\left\{ \begin{array}{l} \sigma = 5 \text{ См/м} \\ \varepsilon = 80 \varepsilon_0 \end{array} \right.$
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	ψ i	$\approx -0,36^\circ$ = 81°
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\ $	= 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 (т. е. 576°) 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.

Информация, содержащаяся в названной Рекомендации, позволяет учесть поправочный коэффициент антенны в вертикальной плоскости. При использовании этого метода необходимо принимать во внимание механизмы распространения земной волны (Рекомендация МСЭ-R P.368).

Метод волноводной моды можно использовать для прогнозирования напряженности поля на частотах до примерно 60 кГц, приняв значение ионосферных параметров β/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.

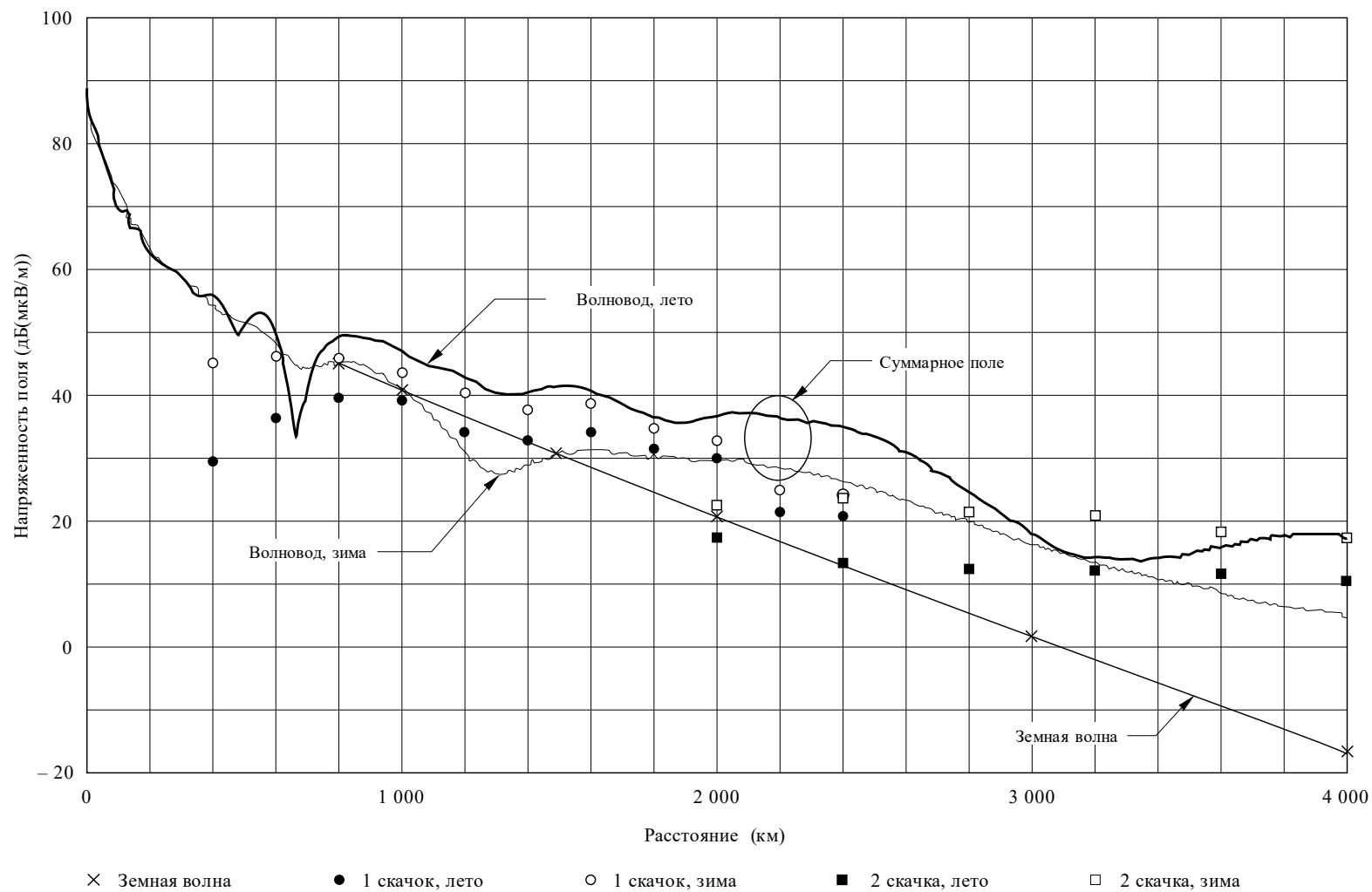
Поскольку нижней границей волновода является Земля, следует учитывать проводимость почвы. Карты проводимости, в основном базирующиеся на геологических характеристиках, приведены в Рекомендации МСЭ-R P.832. На рисунке 43 представлена всемирная карта проводимости на СЧ (которая может быть дополнена картами отдельных стран), в наибольшей степени подходящая для скачкового метода. На рисунках 1–6 представлены карты континентов на ОНЧ, подходящие для использования с волноводным методом на более низких частотах.

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, могут быть 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.

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 24 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 21 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 пространственная волна на односкачковой трассе отсекается и начинает преобладать пространственная волна на двухскачковой трассе, не предпринималось. Земная волна показана отдельно.

РИСУНОК 24



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.

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 (β/H'), приведенные на рисунке 21. Следовательно, надо проявлять осторожность, о чем говорилось выше. Сезонные вариации предсказать нельзя, а значения параметров β/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 25 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.

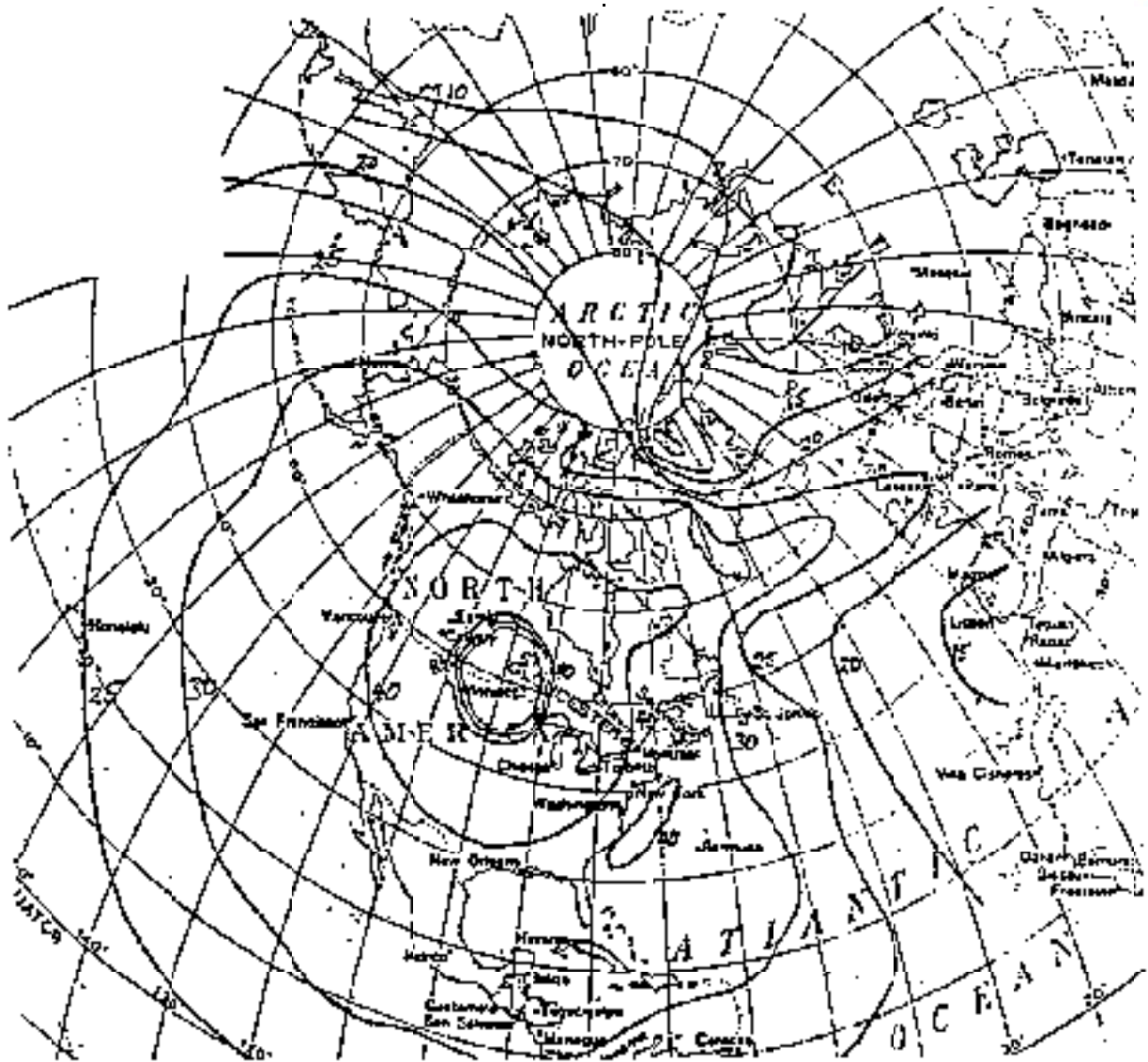
Далее следует еще один пример, показывающий, что проводимость почвы вдоль трассы в целом является важным фактором. В случае скачкового метода важна проводимость почвы лишь вблизи передающей и приемной антенн. На рисунках 27 и 28 показаны кривые спрогнозированных значений напряженности поля в зависимости 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 26). 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 27). Разность частот менее заметна в ночное время (см. рисунок 28).

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

РИСУНОК 25

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

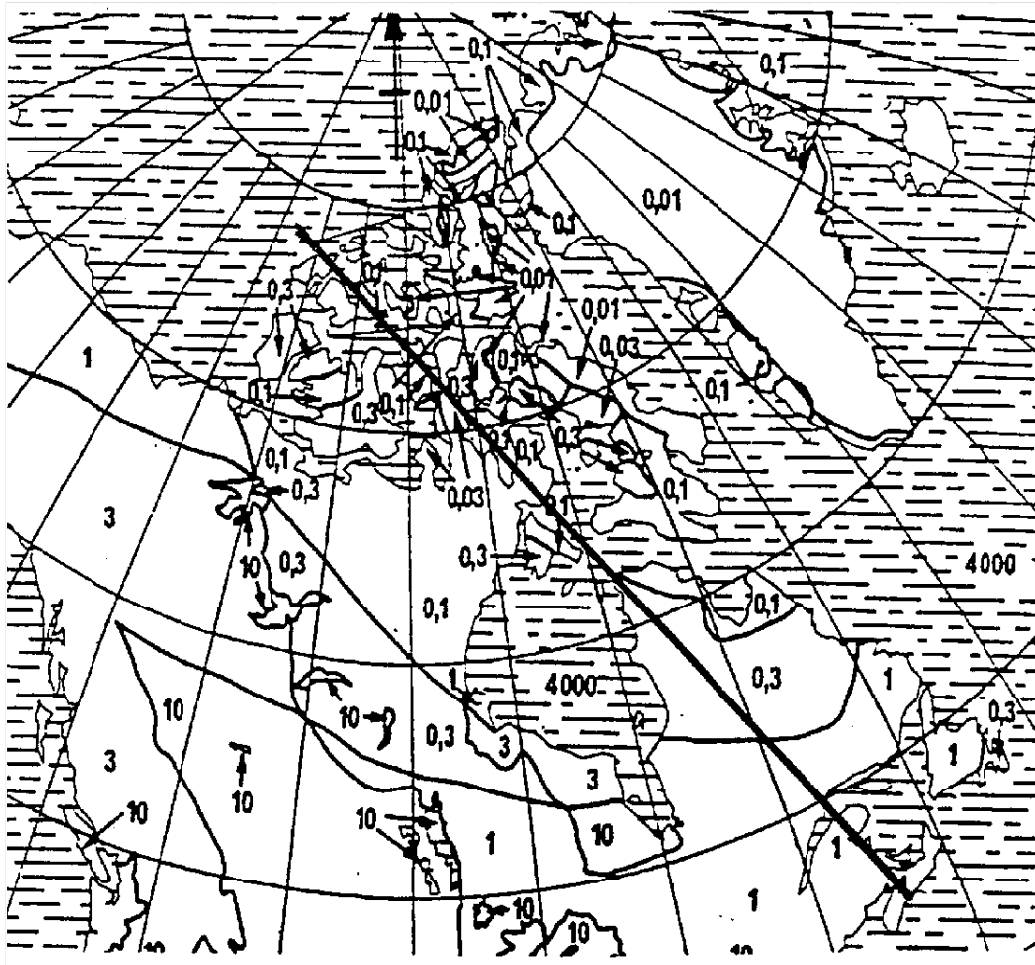
(Частота 24 кГц, лето, дневное время суток)



P0684-25

РИСУНОК 26

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



P.0684-26

РИСУНОК 27

Кривые напряженности поля в зависимости от расстояния для гипотетического передатчика, расположенного в Галифаксе, при азимуте антенны 340° с. ш. для трех частот и излучаемой мощности 1 кВт. Лето, дневное время суток. Трасса передачи показана на рисунке 26

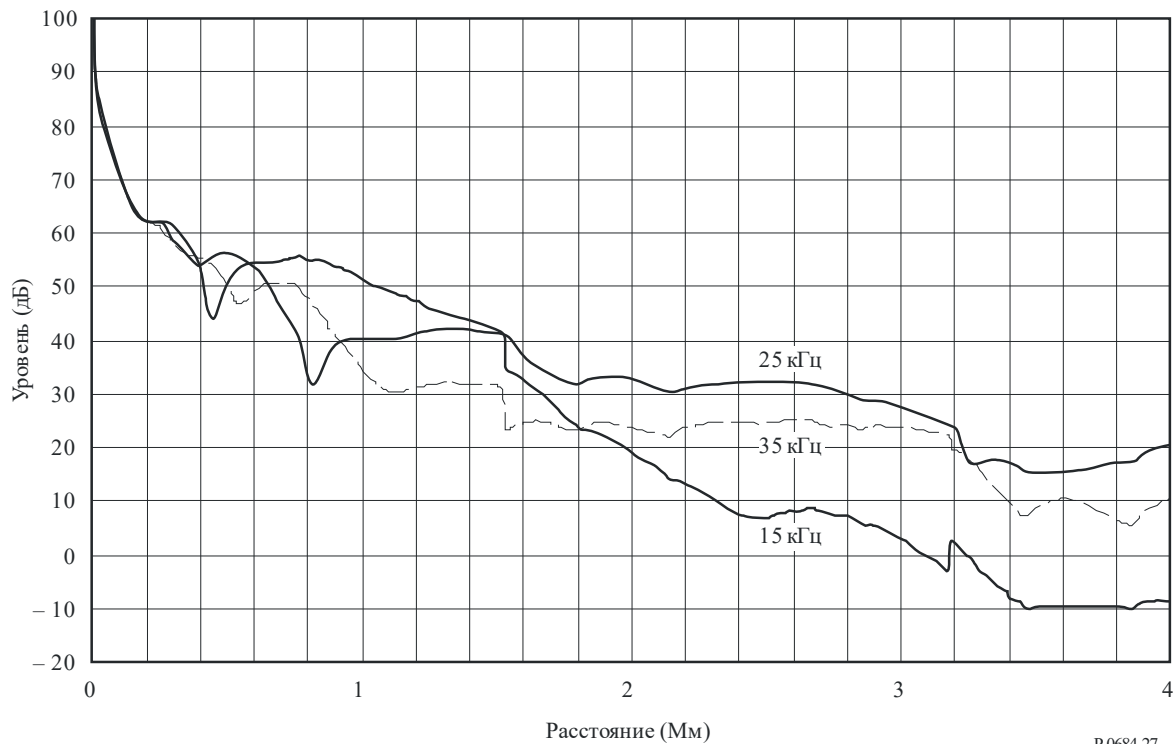


РИСУНОК 28

Кривые напряженности поля в зависимости от расстояния для гипотетического передатчика, расположенного в Галифаксе, при азимуте антенны 340° с. ш. для трех частот и излучаемой мощности 1 кВт. Лето, ночное время суток. Трасса передачи показана на рисунке 26

