

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R P.1147-3

**Прогнозирование напряженности поля пространственной волны
на частотах между приблизительно 150 и 1700 кГц**

(Вопрос МСЭ-R 225/3)

(1995-1999-2003-2005)

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a) что существует потребность в руководстве для инженеров, занимающихся планированием радиовещательных служб в диапазонах НЧ и СЧ;
- b) что для исключения помех вследствие дальнего ионосферного распространения радиоволн важно определить минимальный географический разнос станций, работающих в совмещенных или соседних частотных каналах;
- c) что поскольку отдельные участки этого частотного диапазона используются совместно радиовещательными и другими службами в различных Районах, необходим точный метод прогнозирования уровня помех, для того чтобы обеспечить эффективное и правильное использование этих участков спектра,

рекомендует,

чтобы следующий метод был принят для использования с учетом замечаний относительно точности его применения, обсуждаемым в Приложении 1.

1 Введение

Данный метод прогнозирования предназначен для определения напряженности поля пространственной волны в ночное время, создаваемого излучением данной мощности от одной или нескольких вертикальных антенн при измерении на уровне земли посредством рамочной антенны, ориентированной в вертикальной плоскости вдоль дуги большого круга по направлению к передатчику. Этот метод основан на измерениях в полосах частот, распределенных радиовещанию, и применяется, в частности, для трасс протяженностью от 50 до 12 000 км в диапазонах НЧ и СЧ. Вопросы распространения в дневное время обсуждаются в Приложении 2.

На рисунках 1, 2 и 3 проиллюстрирована основная часть метода прогнозирования. Для удобства геомагнитные карты включены в рисунки 5, 6 и 10. На остальных рисунках и в Дополнении 1 содержится дополнительная информация для упрощения использования данного метода.

2 Годовые медианные значения напряженности поля в ночное время

Прогнозируемая величина напряженности поля в ночное время определяется выражением:

$$E = V + E_0 - L_t = V + G_S - L_p + A - 20 \log p - L_a - L_t - L_r, \quad (1)$$

где:

E : годовая медиана получасовых медианных значений напряженности поля (дБ(мкВ/м)) для данной симмотивной силы передатчика, V , в данное время t относительно захода или восхода Солнца, в зависимости от ситуации;

E_0 : годовая медиана получасовых медианных значений напряженности поля (дБ(мкВ/м)) для симмотивной силы передатчика 300 В в эталонное время, определенное в п. 2.1;

- V : симомотивная сила передатчика (в дБ относительно эталонной симомотивной силы 300 В) (см. п. 2.2);
- G_S : поправка на усиление за счет влияния моря (дБ) (см. п. 2.3);
- L_p : добавочные потери за счет деполяризации (дБ) (см. п. 2.4);
- A : константа. На НЧ $A = 110,2$. На СЧ $A = 107$, за исключением трасс распространения, средние точки которых расположены в части Района 3 южнее параллели 11° ю.ш. В этих случаях $A = 110$;
- L_a : коэффициент потерь, отражающий влияние ионосферного поглощения и связанных с ним факторов (см. п. 2.6);
- L_t : часовой коэффициент потерь (дБ) (см. п. 2.7);
- L_r : коэффициент потерь, учитывающий влияние солнечной активности (п. 2.8).

На рисунке 4 представлена зависимость E_0 от расстояния d вдоль земной поверхности для различных геомагнитных широт при равных нулю значениях G_S , L_p и R ; где R – международное относительное число солнечных пятен, сглаженное за 12 месяцев.

2.1 Эталонное время

Эталонным считается время через шесть часов после захода Солнца в точке S на земной поверхности. Если длина трассы не превышает 2000 км, то точка S находится в ее середине. На более протяженных трассах S располагается на расстоянии 750 км по дуге большого круга от терминала с более поздним заходом Солнца.

2.2 Симомотивная сила

Симомотивная сила передатчика V (дБ(300 В)) определяется выражением:

$$V = P + G_V + G_H, \quad (2)$$

где:

- P : излучаемая мощность (дБ(1 кВт));
- G_V : коэффициент усиления передающей антенны (дБ) в вертикальной плоскости, приведенный на рисунке 1;
- G_H : коэффициент усиления передающей антенны (дБ) в горизонтальной плоскости. В случае направленной антенны G_H зависит от азимута. Для всенаправленных антенн $G_H = 0$.

2.3 Усиление за счет влияния моря

Коэффициент усиления за счет влияния моря, G_S , характеризует дополнительное усиление сигнала, когда один или оба терминала располагаются вблизи моря, однако этот коэффициент не учитывается при распространении над пресной водой. Для одного терминала G_S равен:

$$G_S = G_0 - c_1 - c_2 \quad \text{для} \quad (c_1 + c_2) < G_0 \quad (3)$$

$$G_S = 0 \quad \text{для} \quad (c_1 + c_2) \geq G_0, \quad (4)$$

где:

- G_0 : усиление за счет влияния моря, когда терминал располагается на побережье и трасса не заслоняется какой-либо сушей (дБ);
- c_1 : поправка, учитывающая удаление терминала от моря;
- c_2 : поправка, учитывающая ширину одного или нескольких каналов на море или наличие островов.

Если оба терминала располагаются вблизи моря, то G_S представляет собой сумму величин для каждого из терминалов.

На рисунке 2 представлена зависимость G_0 от d в диапазонах НЧ и СЧ. На СЧ $G_0 = 10$ дБ при $d > 6500$ км; на НЧ $G_0 = 4,1$ дБ при $d > 5000$ км, где d – расстояние между двумя терминалами вдоль земной поверхности.

Поправка c_1 определяется выражением:

$$c_1 = \frac{s_1}{r_1} G_0, \quad (5)$$

где:

s_1 : удаление терминала от моря, измеренное по дуге большого круга (км);

$r_1 = 10^3 G_0^2 / Q_1 f$ км;

f : частота (кГц);

$Q_1 = 0,30$ на НЧ и $1,4$ на СЧ.

Поправка c_2 определяется выражением:

$$c_2 = \alpha G_0 \left(1 - \frac{s_2}{r_2} \right) \quad \text{для} \quad s_2 < r_2 \quad (6)$$

$$c_2 = 0 \quad \text{для} \quad s_2 \geq r_2, \quad (7)$$

где:

s_2 : удаление терминала от следующего участка суши, измеренное по дуге большого круга (км);

$r_2 = 10^3 G_0^2 / Q_2 f$ км;

$Q_2 = 0,25$ на НЧ и $1,2$ на СЧ;

α : относительная часть суши на участке трассы от r_2 до s_2 ($0 < \alpha \leq 1$).

Если используется компьютер, но банк данных о местности для вычисления α отсутствует, то α полагают равным $0,5$, что означает наличие равных долей суши и моря на участке трассы от r_2 до s_2 .

Для упрощения расчетов на рисунке 8а показаны значения r_1 , наибольшего удаления от моря, для которого необходимо рассчитать усиление вследствие влияния моря, а на рисунке 8б – значения r_2 , наибольшего расстояния до следующего участка суши, для которого требуется вводить поправку c_2 . Эти величины приводятся для различных частот.

2.4 Потери за счет деполяризации

L_p характеризует добавочные потери за счет деполяризации (дБ). В диапазоне НЧ $L_p = 0$. В диапазоне СЧ L_p для одного терминала определяется одной из следующих формул:

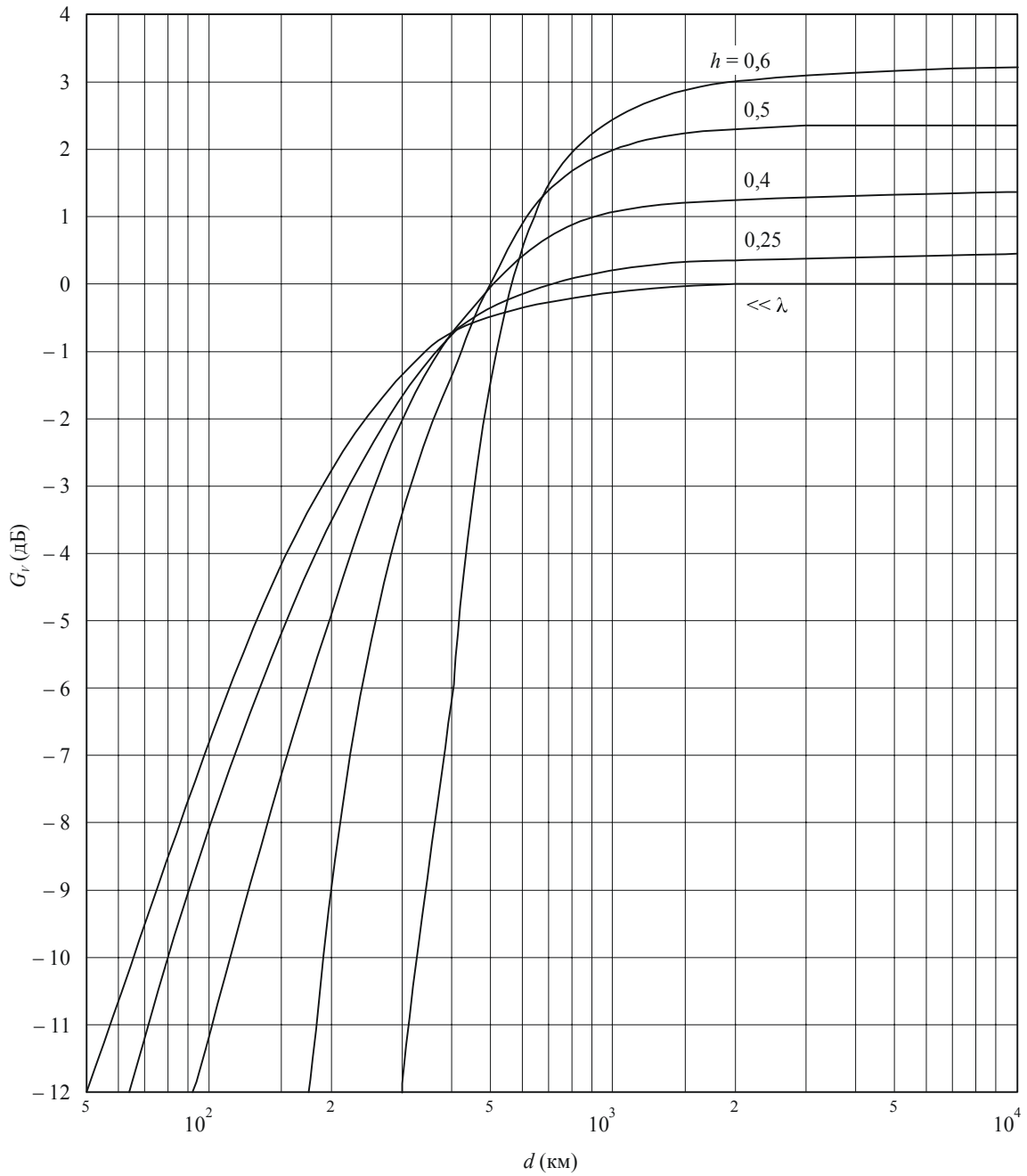
$$\begin{aligned} L_p &= 180 (36 + \theta^2 + I^2)^{-1/2} - 2 & \text{дБ} & \quad \text{для} \quad I \leq 45^\circ \\ L_p &= 0 & \text{дБ} & \quad \text{для} \quad I > 45^\circ, \end{aligned} \quad (8)$$

где I – магнитное склонение С или Ю (в градусах) в точке размещения терминала, а θ – азимут трассы в градусах, измеренный относительно магнитного направления В-З, так что $|\theta| \leq 90^\circ$. Из-за того, что двум терминалам могут соответствовать разные значения θ и I , L_p следует вычислять отдельно для каждого из них, а результаты суммировать. При определении θ и I следует использовать наиболее точные из имеющихся величин магнитного склонения и склонения (см. рисунки 5 и 6).

На рисунке 7 показаны величины L_p , вычисленные с помощью уравнения (8).

РИСУНОК 1

Коэффициент усиления передающей антенны в виде одиночного несимметричного вибратора (G_r) над идеальной Землей

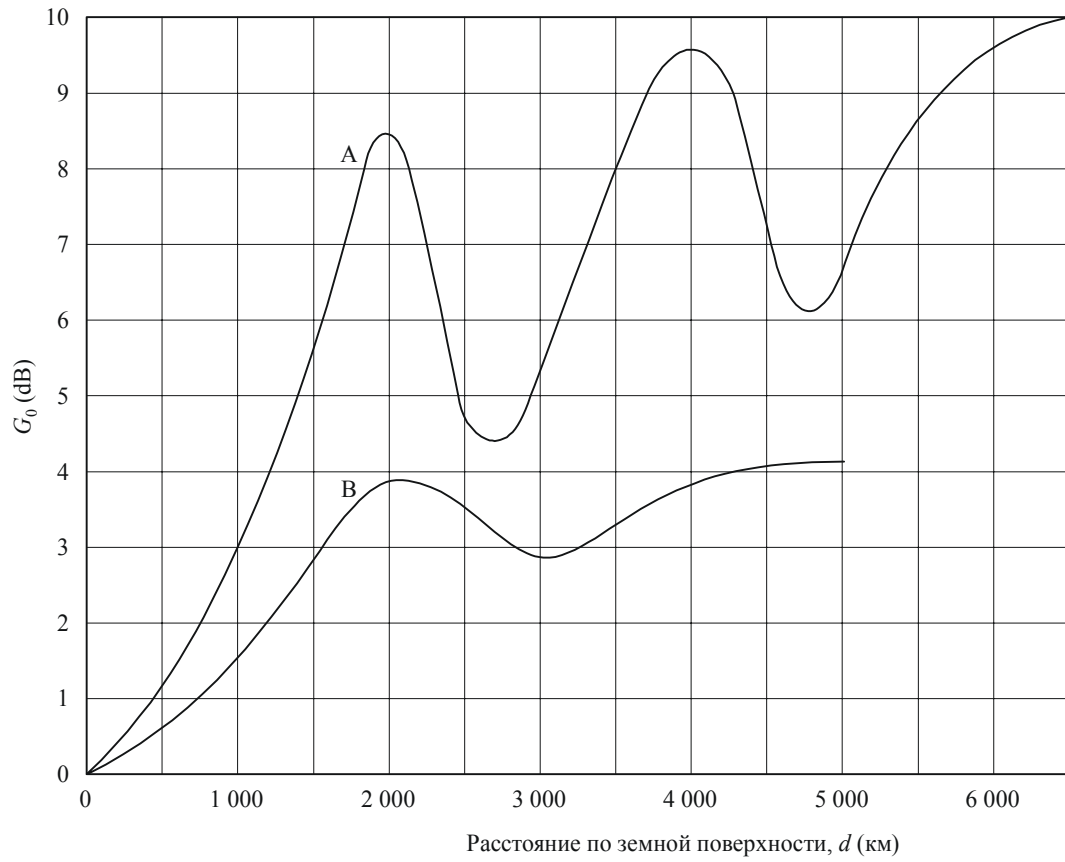


h : высота антенны

Примечание 1. – При $10\,000\text{ км} < d < 12\,000\text{ км}$, следует использовать значение $d = 10\,000\text{ км}$.

РИСУНОК 2

Усиление вследствие влияния моря (G_0) при расположении одного из терминалов на морском берегу

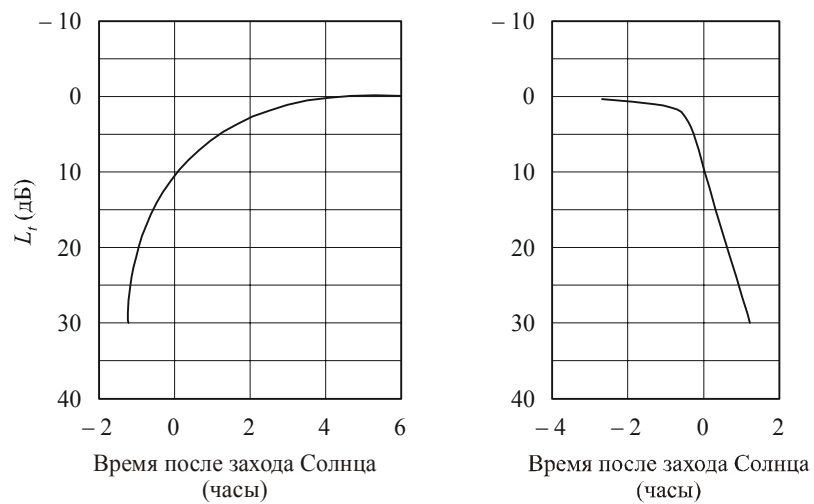


Кривые А: диапазон СЧ
В: диапазон НЧ

1147-02

РИСУНОК 3

Часовой коэффициент потерь (L_t)



1147-03

2.5 Дальность наклонного распространения, p

Для трасс протяженностью свыше 1 000 км p (км) приблизительно равно расстоянию вдоль земной поверхности между передатчиком и приемником, d (км). Для более коротких трасс:

$$p = (d^2 + 40\,000)^{1/2} \quad (9)$$

Уравнение (9) может использоваться с пренебрежимо малой погрешностью для трасс любой протяженности. Его следует применять во всех случаях, когда рассматриваются расстояния как меньше, так и больше 1 000 км, чтобы избежать разрывов в функциональной зависимости напряженности поля от расстояния.

2.6 Коэффициент потерь, отражающий влияние ионосферного поглощения и связанных с ним факторов

L_a – это коэффициент потерь, отражающий влияние ионосферного поглощения, фокусировки, потерь в терминалах, а также межскачковые потери на многоскачковых трассах.

$$L_a = k \sqrt{p / 1\,000} \quad (10)$$

и коэффициент основных потерь k определяется выражением:

$$k = (2\pi + 4,95 \tan^2 \Phi) \quad (11)$$

В уравнении (11) Φ – это геомагнитная широта (диполя) средней точки исследуемой трассы. Северные широты считаются положительными, южные – отрицательными. Рисунок 10 можно использовать для определения геомагнитной широты по известным географическим координатам средней точки трассы. Если Φ больше $+60^\circ$, уравнение (11) вычисляется для $\Phi = +60^\circ$. Если Φ меньше -60° , уравнение (11) вычисляется для $\Phi = -60^\circ$. Трассы, превышающие 3000 км, делятся на два равных участка, для каждого из которых с помощью уравнения (11) вычисляется свое значение k . Для вычисления напряженности поля используется алгебраическое среднее из двух значений k (k_{eff}) (см. рисунок 9).

2.7 Часовой коэффициент потерь

График часового коэффициента потерь, L_t (дБ), показан на рисунке 3. Время t отсчитывается в часах относительно времени восхода или захода Солнца в зависимости от ситуации. За это время принимается время на поверхности земли в средней точке трассы для трасс с $d < 2000$ км. Для трасс протяженностью более 2000 км время определяется в точках на расстоянии 750 км от каждого терминала, и выбранное время относится к точке, где угол места Солнца выше. Большие значения часового коэффициента потерь в околополуденное время не определяются (рисунок 3). Для этого периода используется предельное значение коэффициента, равное 30 дБ. Часовой коэффициент потерь не вычисляется для трасс, проходящих на высоких широтах и для сезонов, когда Солнце не восходит и не заходит.

Уравнения, в общих чертах аппроксимирующие эти кривые с точностью до 0,5 дБ, приводятся в п. 1 Дополнения 1. На рисунке 3 представлены средние годовые величины суточных вариаций.

На рисунке 11 показано время захода и восхода Солнца для ряда месяцев и географических широт. Уравнения, эквивалентные этим кривым восхода и захода, приводятся в п. 2 Дополнения 1.

2.8 Коэффициент потерь, учитывающий влияние солнечной активности

L_r – коэффициент потерь, учитывающий влияние солнечной активности, определяется по следующим формулам:

$$\begin{aligned} &\text{в диапазоне НЧ,} && L_r = 0 \\ &\text{в диапазоне СЧ,} && \text{если } |\Phi| \leq 45^\circ, \quad L_r = 0 \\ &\text{в диапазоне СЧ,} && \text{если } |\Phi| > 45^\circ, \quad L_r = b(R/100) (p/1\,000) \quad \text{дБ,} \end{aligned} \quad (12)$$

где:

$$b = (|\Phi| - 45)/3, \quad \text{за исключением Европы, где независимо от широты} \\ \text{следует использовать } b = 1. \quad (13)$$

Трассы протяженностью более 3000 км делятся на два равных участка, как описано в п. 2.6. Для каждого участка рассчитывается свое L_r , затем эти величины складываются.

3 Изменения ото дня ко дню и кратковременные изменения уровней напряженности поля в ночное время

Разность, $\Delta(w)$, где w равно, как правило, 10 или 1, в конкретное время относительно захода или восхода Солнца, между значением напряженности поля, превышенным в течение w % времени, и годовым медианным значением, определяется как:

$$\text{в диапазоне НЧ: } \Delta(10) = 6,5 \quad \text{дБ} \quad (14)$$

$$\text{и } \Delta(1) = 11,5 \quad \text{дБ} \quad (15)$$

$$\text{в диапазоне СЧ: } \Delta(10) = 0,2 |\Phi| - 2 \quad \text{дБ} \quad (16)$$

$$\text{и } \Delta(1) = 0,2 |\Phi| + 3 \quad \text{дБ} \quad (17)$$

В уравнении (16) $\Delta(10)$ больше или равно 6 дБ, но меньше или равно 10 дБ. В уравнении (17) $\Delta(1)$ больше или равно 11 дБ, но меньше или равно 15 дБ.

РИСУНОК 4а

Кривые, показывающие уровни E_0 для НЧ, когда все параметры G_s , L_p и R равны нулю, для постоянных геомагнитных широт

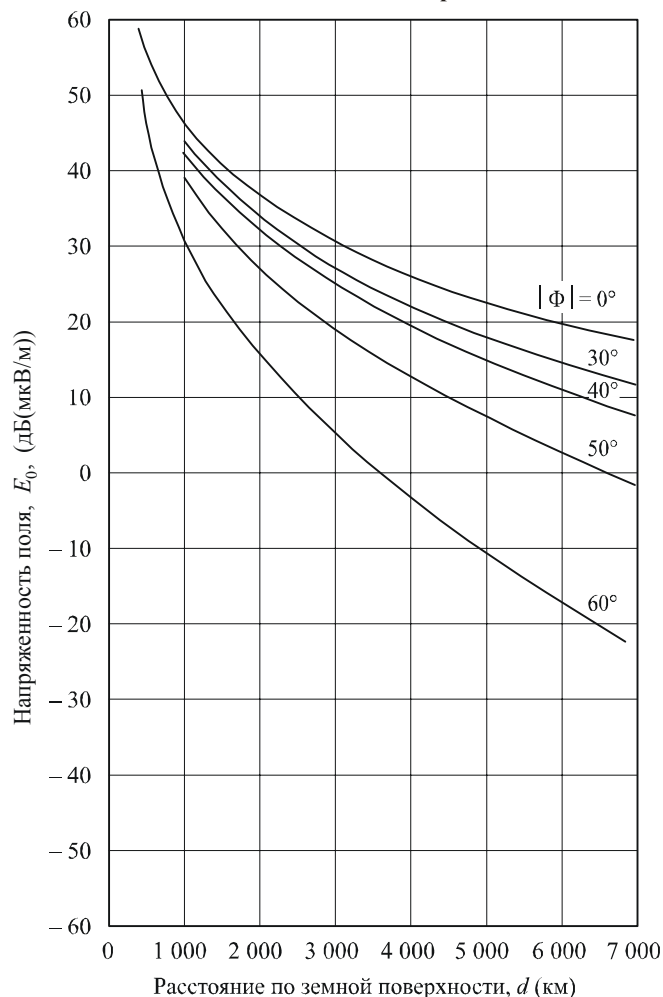
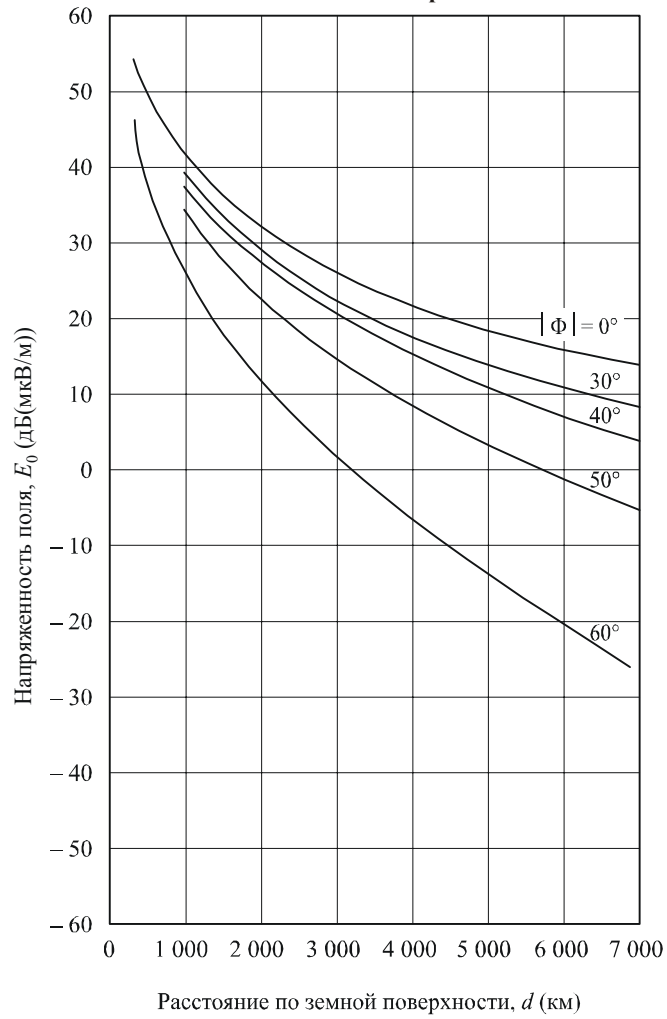


РИСУНОК 4б

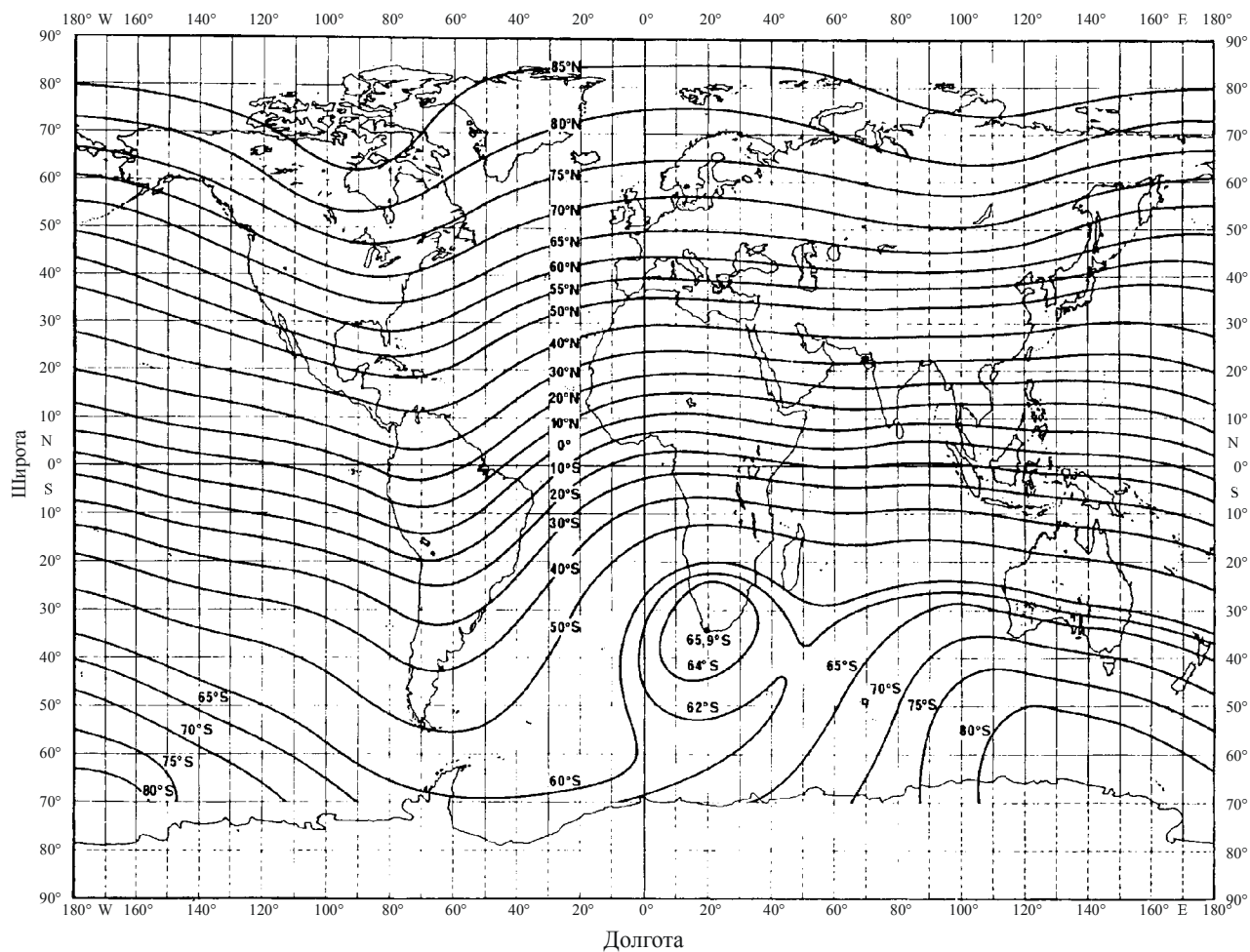
Кривые, показывающие уровни E_0 для СЧ, когда все параметры G_s , L_p и R равны нулю, для постоянных геомагнитных широт



Примечание 1. – Для применений в южной части Района 3 добавляется 3 дБ.

1147-04б

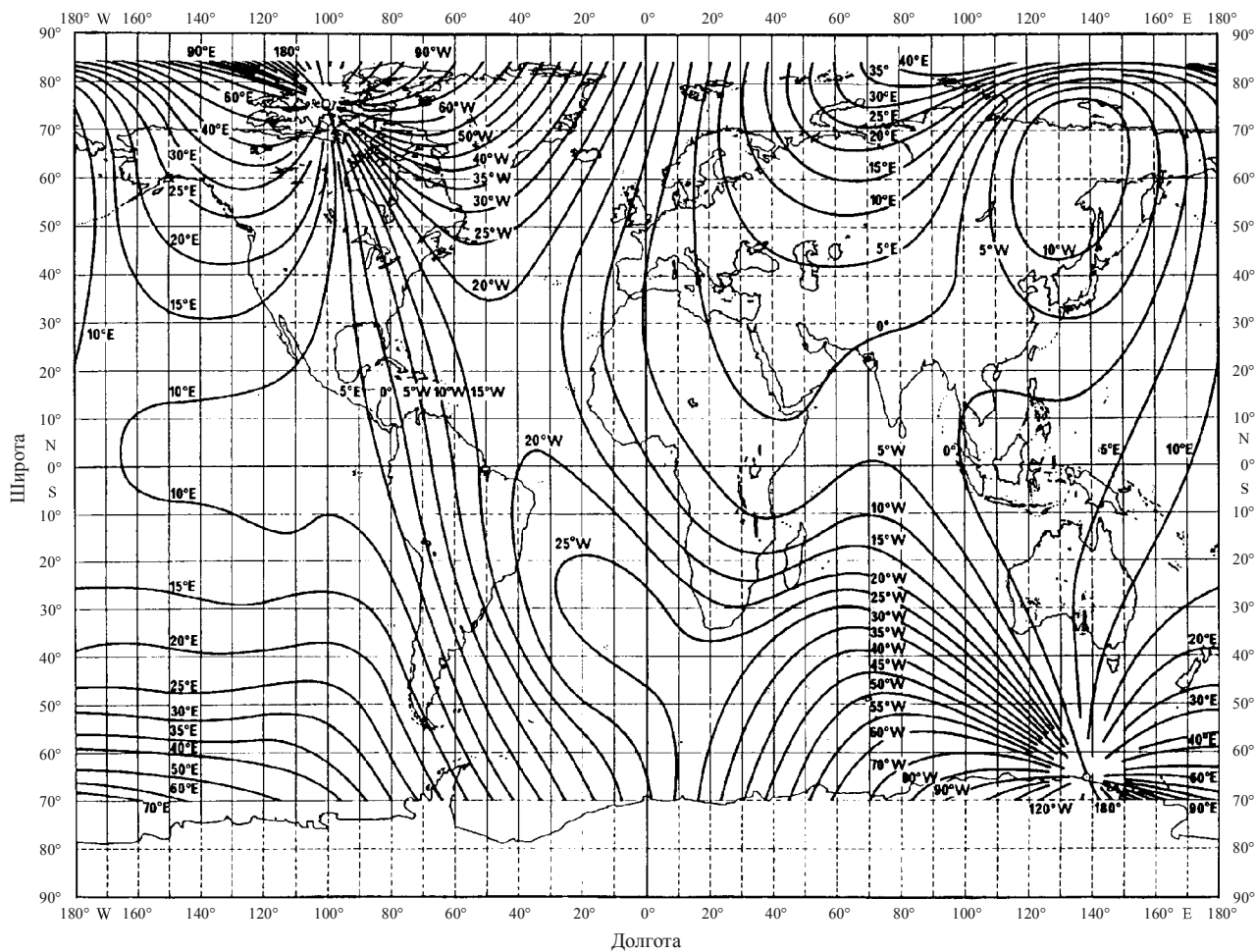
РИСУНОК 5
Карта магнитного наклонения (цикл 1975,0)



(Источник: Карта № 30 магнитного наклонения или склонения (цикл 1975,0) Всемирного картографического агентства
Гидрографического центра Министерства обороны США)

1147-05

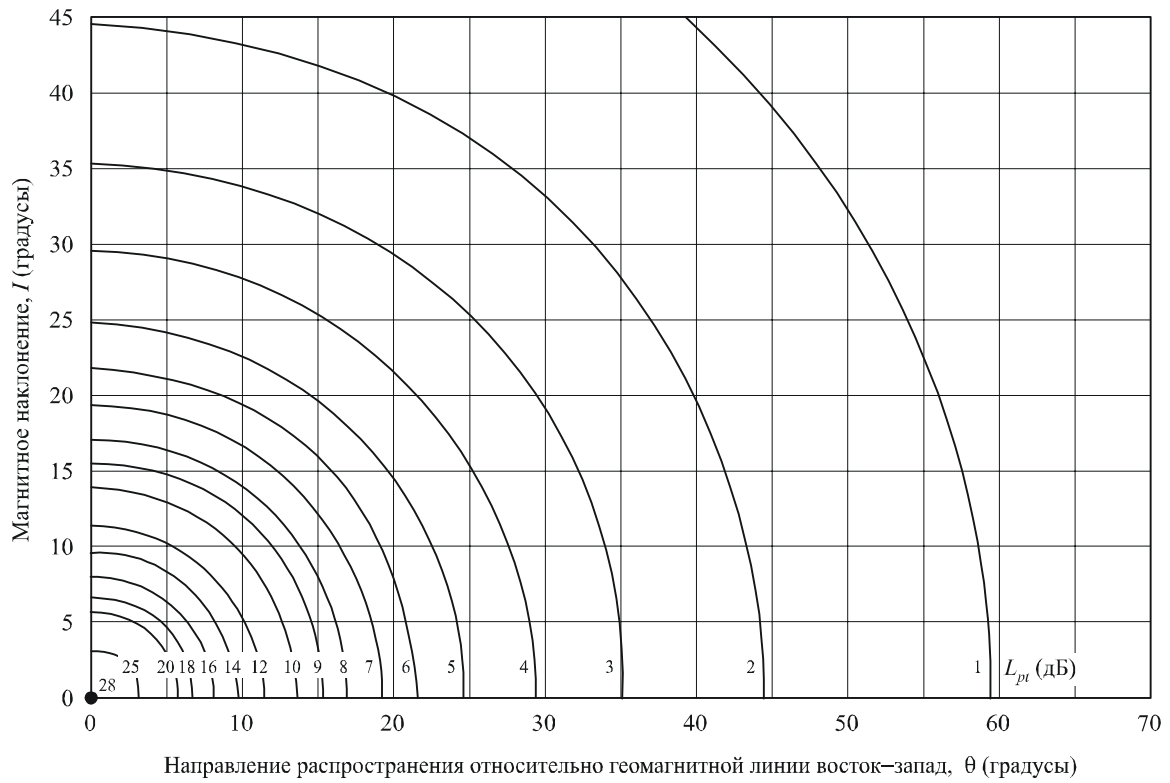
РИСУНОК 6
Карта магнитного склонения (цикл 1975,0)



(Источник: Карта ; 42 магнитного наклонения или склонения (цикл 1975,0) Всемирного картографического агентства Гидрографического центра Министерства обороны США)

1147-06

РИСУНОК 7

Добавочные потери, L_p , за счет деполяризации (для одного терминала)

$$L_p = 180 (36 + \theta^2 + I^2)^{-1/2} - 2$$

1147-07

РИСУНОК 8а
Величины r_1 для различных частот

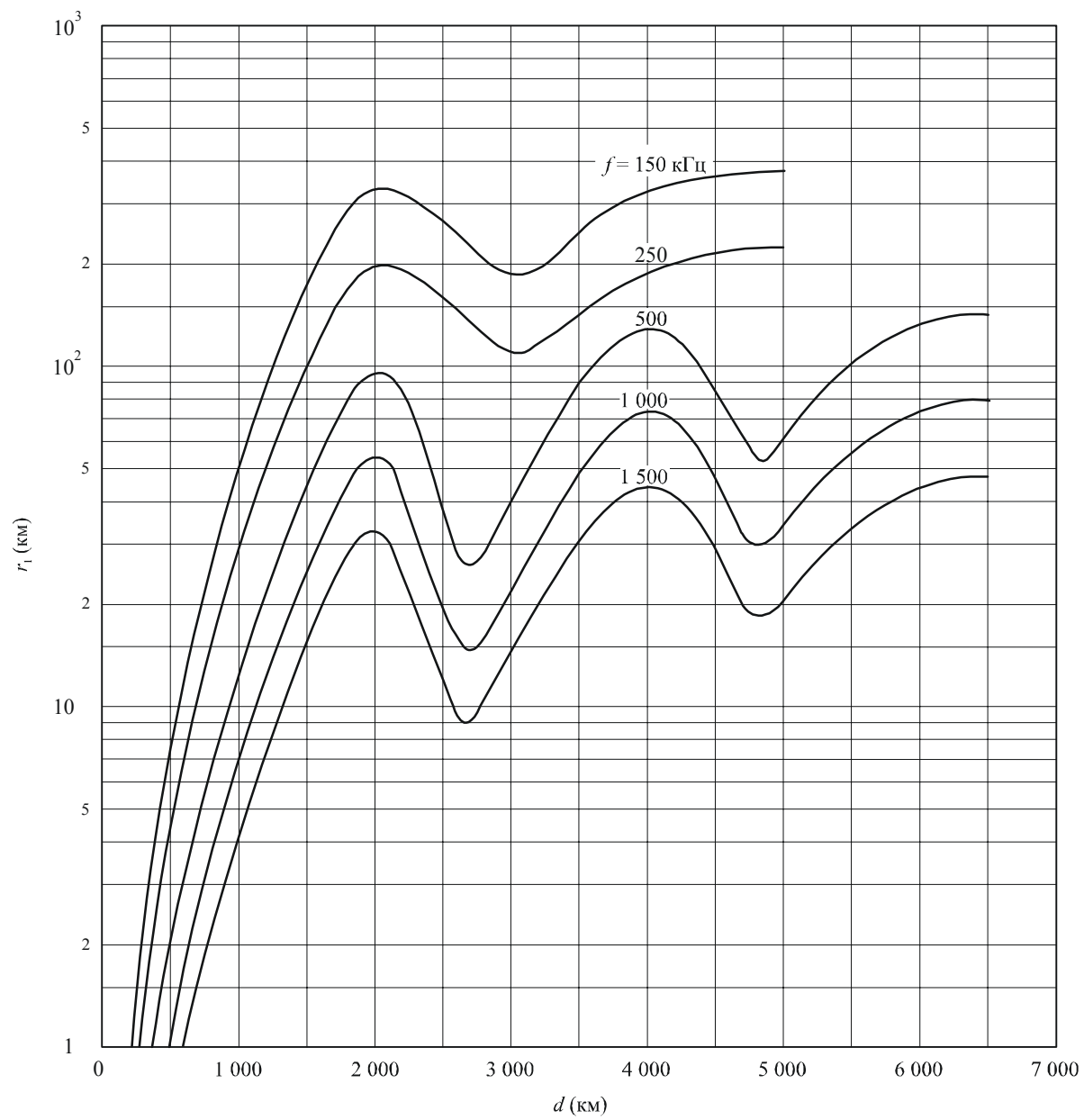


РИСУНОК 8б
Величины r_2 для различных частот

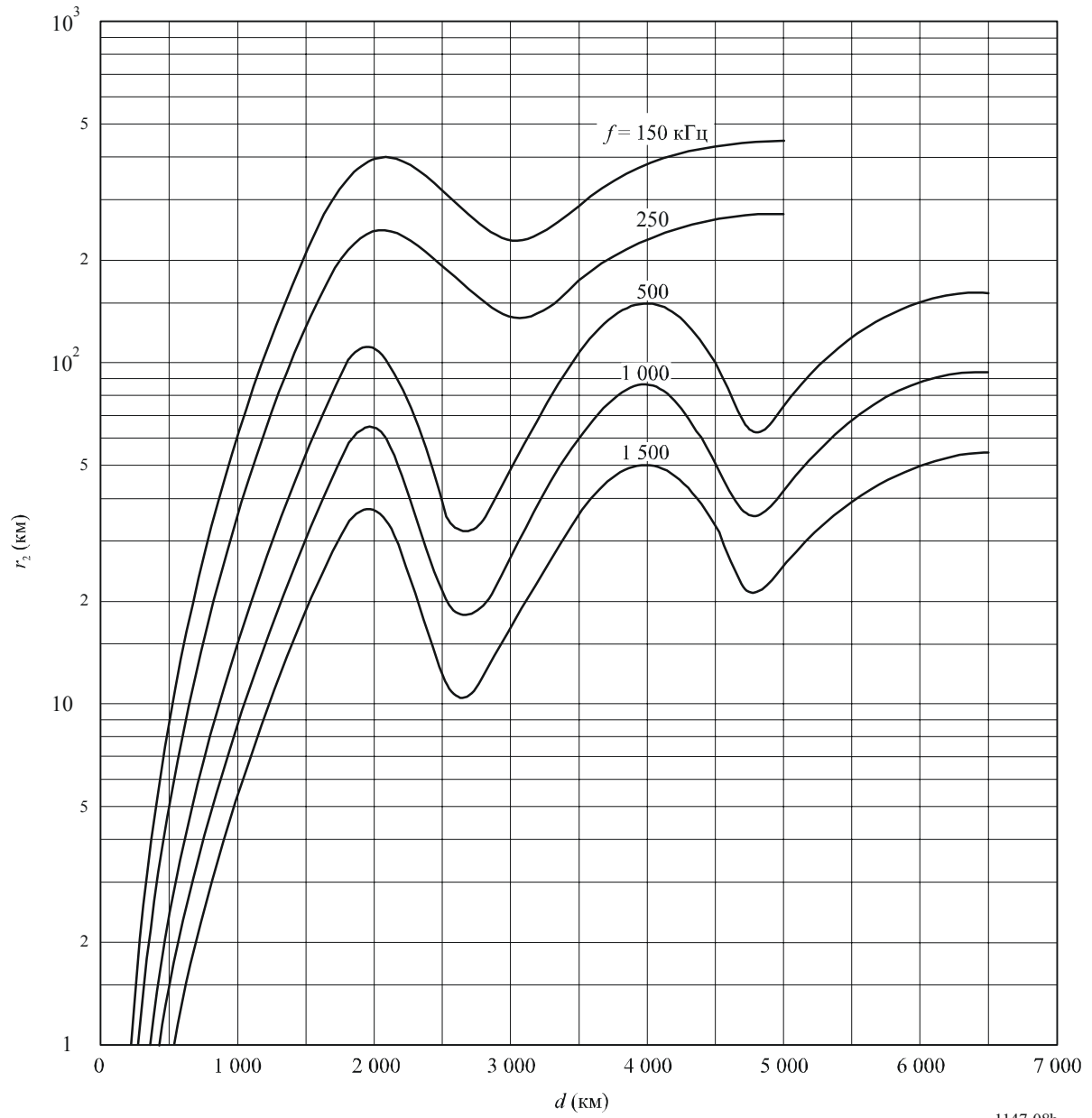
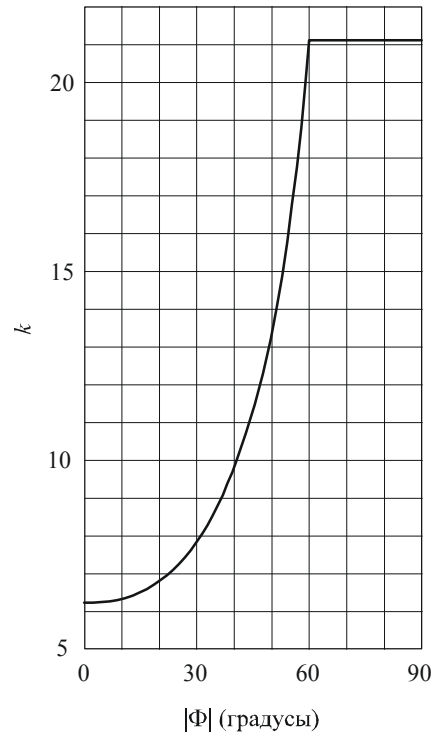


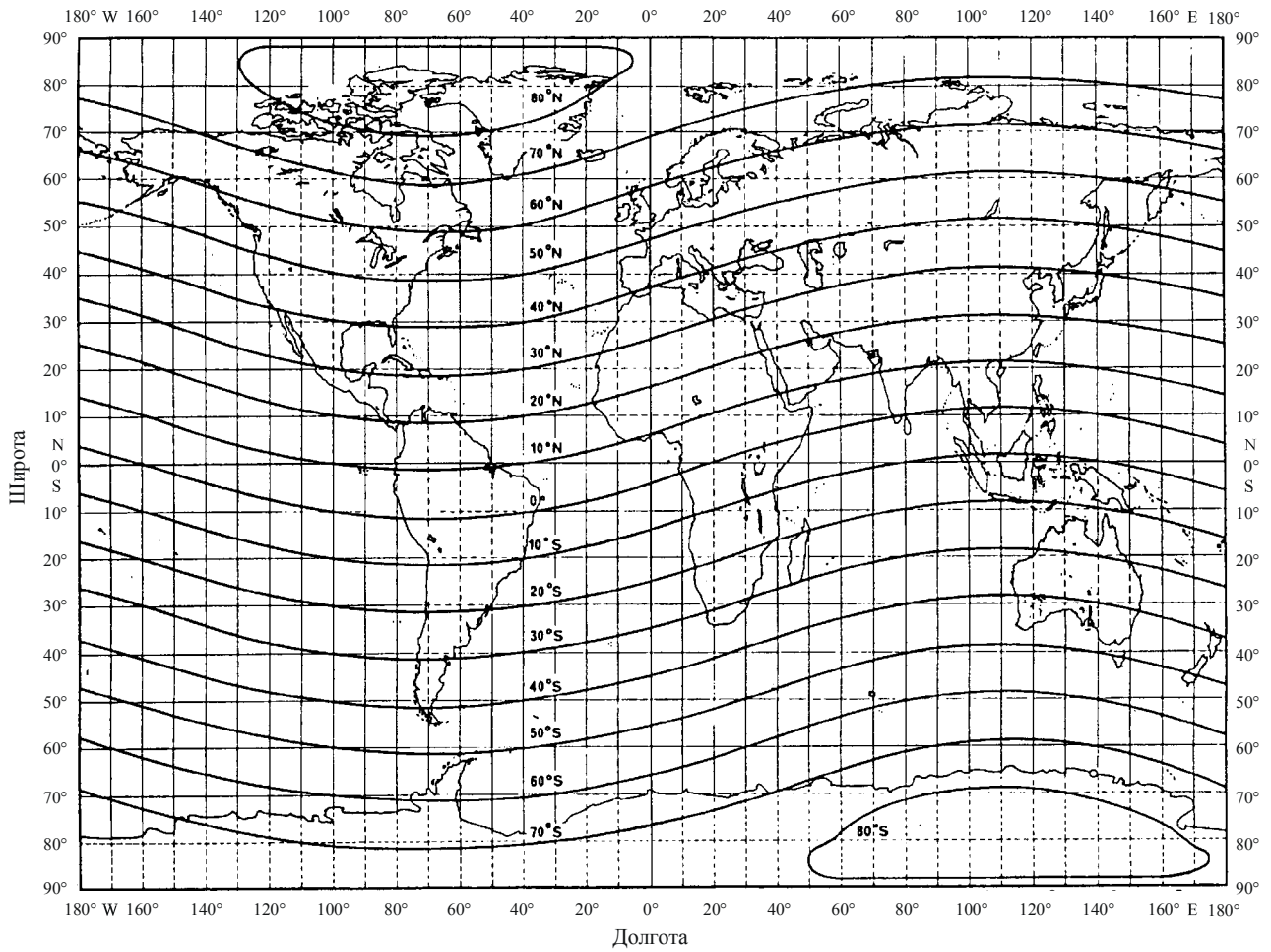
РИСУНОК 9
Коэффициент основных потерь



$$k = (2\pi + 4,95 \tan^2 \Phi) \text{ при } |\Phi| \leq 60^\circ$$

1147-09

РИСУНОК 10
Геомагнитные широты



$$\Phi = \arcsin [\sin \alpha \cdot \sin 78,5^\circ + \cos \alpha \cdot \cos 78,5^\circ \cdot \cos (69^\circ + \beta)]$$

Φ : геомагнитная широта

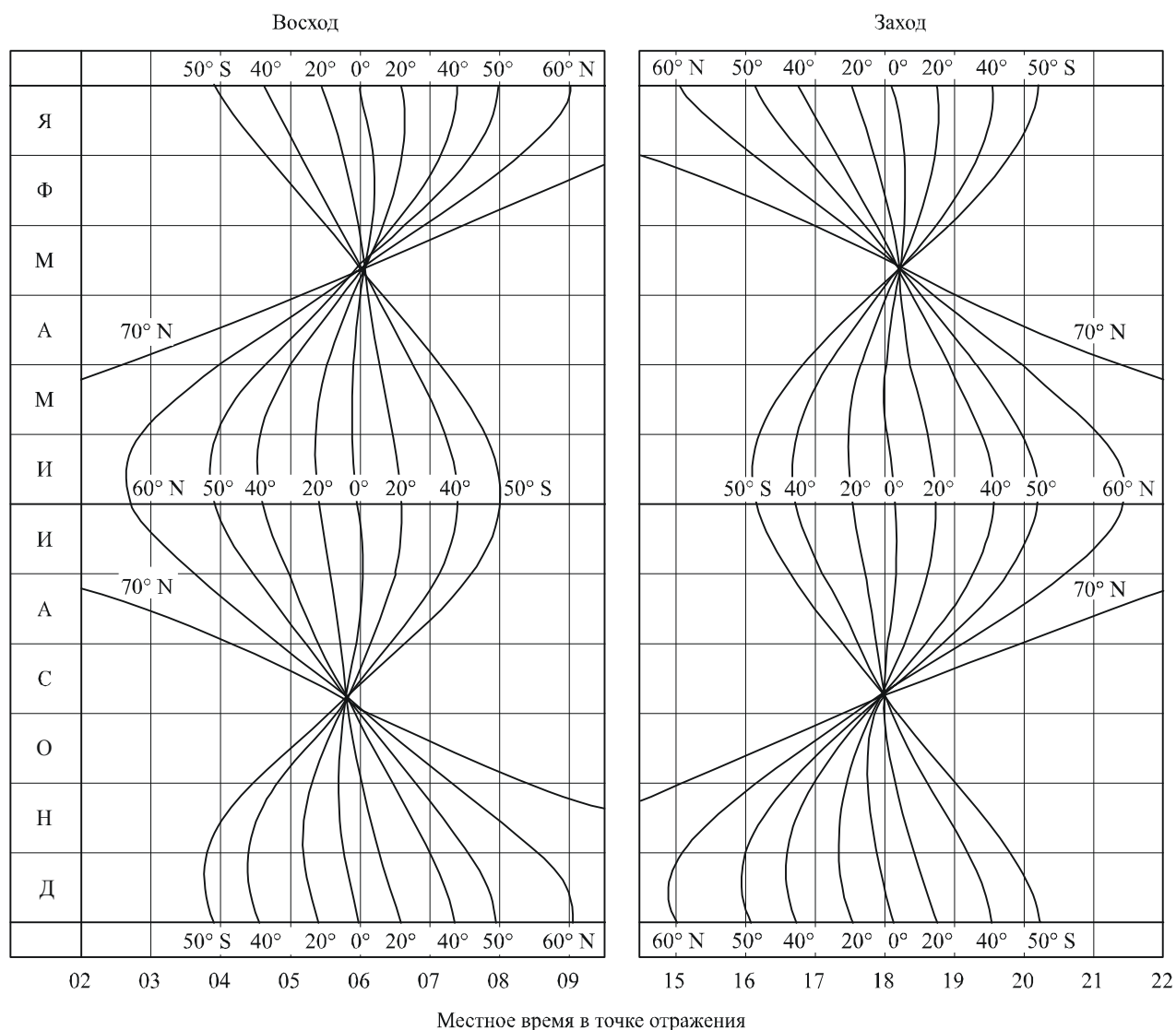
α : географическая широта

β : географическая долгота

Северные и восточные координаты считаются положительными, а южные и западные — отрицательными.

РИСУНОК 11

Время восхода и захода солнца в различные месяцы на разных географических широтах



1147-11

Дополнение 1

В настоящем Дополнении представлены уравнения, которые могут быть использованы вместо рисунков 3 и 11 для расчета часового коэффициента потерь и времени захода и восхода Солнца, соответственно. В этом Дополнении используются следующие дополнительные символы.

Список символов

α : географическая широта точки на трассе (в градусах)

β : географическая долгота точки на трассе (в градусах)

S : местное среднее время захода или восхода Солнца в точке на трассе (в часах).

Северные и восточные координаты считаются положительными, а южные и западные – отрицательными.

1 Часовой коэффициент потерь: L_t

Приводимые ниже уравнения можно использовать вместо кривых, представленных на рисунке 3, в установленных пределах изменения t . В часы между этими значениями времени (то есть около полуночи) полагают $L_t = 0$.

$$L_t \text{ (заход Солнца)} = 12,40 - 9,248 t + 2,892 t^2 - 0,3343 t^3 \quad \text{для } -1 < t \text{ (заход Солнца)} < 4$$

$$L_t \text{ (восход Солнца)} = 9,6 + 12,2 t + 5,62 t^2 + 0,86 t^3 \quad \text{для } -3 < t \text{ (восход Солнца)} < 1,$$

где t – время, отсчитанное в часах, относительно захода или восхода Солнца в средней точке трассы.

2 Время захода и восхода Солнца

Для неполярных районов, то есть таких, где $|\alpha| < 65^\circ$, время захода и восхода Солнца можно рассчитать с точностью до ± 2 мин по следующей схеме:

N : день года, в днях; например, 1 января = 1

S' : приблизительное местное время события, например, захода Солнца = 1800 ч, восход Солнца = 0600 ч

Z : зенитный угол Солнца (в градусах) = $90,8333^\circ (90^\circ 50')$ во время захода или восхода Солнца.

Шаг 1: Вычислить долготу в точке наблюдения, B :

$$B = \beta / 15 \quad \text{ч}$$

Шаг 2: Вычислить время события, Y :

$$Y = N + (S' - B) / 24 \quad \text{дни}$$

Шаг 3: Вычислить среднюю солнечную аномалию, M :

$$M = 0,985600 Y - 3,289 \quad \text{градусы}$$

Шаг 4: Вычислить долготу Солнца, L :

$$L = M + 1,916 \sin M + 0,020 \sin 2 M + 282,634 \quad \text{градусы}$$

Заметьте, в каком квадранте находится L .

Шаг 5: Вычислить прямое восхождение Солнца, RA :

$$\tan RA = 0,91746 \tan L$$

Отметим, что RA должно находиться в том же квадранте, что и L .

Шаг 6: Вычислить склонение Солнца, s :

$\sin s = 0,39782 \sin L$, откуда:

$$\cos s = + \sqrt{1 - \sin^2 s}$$

Заметим, что $\sin s$ может быть как положительным, так и отрицательным, тогда как $\cos s$ всегда положителен.

Шаг 7: Вычислить местный часовой угол Солнца, H :

$$\cos H = x = (\cos Z - \sin s \cdot \sin \alpha) / (\cos s \cdot \cos \alpha)$$

Отметим, что если $|x| > 1$, то нет ни захода, ни восхода Солнца.

Значение H в градусах получим из $\cos H$; для восхода Солнца $180 < H < 360$; для захода Солнца $0 < H < 180$.

Шаг 8: Вычислить местное среднее время события, S :

$$S = H / 15 + RA / 15 - 0,065710 Y - 6,622$$

Заметим, что S выражено в часах и что следует прибавить или вычесть числа, кратные 24, чтобы $0 < S < 24$.

Отметим, что S – это местное время в рассматриваемой точке. Соответствующее поясное время равно $S - B + \beta_m / 15$ часов, где β_m – долгота опорного меридиана для соответствующего временного пояса (в градусах), так что, например, универсальное время = $S - B$.

Приложение 1

Точность метода

Настоящий метод применим для трасс протяженностью от 50 до 12 000 км в диапазонах НЧ и СЧ. Однако в диапазоне НЧ точность метода была проверена лишь для трасс протяженностью до 7500 км.

Особый подход к южной части Района 3 вероятно не был бы необходим, если бы вместо геомагнитной широты использовалась "исправленная геомагнитная широта". В любом случае настоящий метод следует использовать с осторожностью для геомагнитных широт больших 60° .

Уравнение (6), описывающее изменение G_S от расстояния s_2 до следующего участка суши, выведено теоретически и поэтому его следует считать временным до получения данных измерений.

Данный метод обеспечивает прогноз напряженности поля, соответствующий наблюдаемым величинам, если передатчик и приемник располагаются на почве со средней проводимостью, как правило, от 3 до 10 мСм/м. В некоторых районах (см., например, Рекомендацию МСЭ-R P.832) эффективная проводимость почвы может составлять всего лишь 0,5 мСм/м или достигать 40 мСм/м. Если в месте расположения какого-либо терминала проводимость почвы имеет величину на порядок меньше, чем 10 мСм/м, то это может вызвать уменьшение напряженности поля до 10 дБ. Если же проводимость почвы на порядок меньше вблизи обоих терминалов, то снижение напряженности поля удвоится. Суммарное затухание зависит от протяженности трассы и достигает наибольшей величины для волн, приближающихся к скользящему падению. Этот метод можно улучшить, введя поправку на проводимость почвы при ее существенном отличии от проводимости среднего грунта, например, используя информацию, содержащуюся в Справочнике МСЭ-R – Ионосфера и ее влияние на распространение радиоволн.

Данный метод основан на предположении, что радиоволны отражаются только или преимущественно от слоя E. Однако если $f > (foE) \sec i$, где foE – критическая частота слоя E, а i – угол падения волны на слой E, то волна будет проникать через слой E и отражаться от слоя F. С наибольшей вероятностью это может произойти на самых высоких частотах СЧ диапазона при расстояниях вдоль земной поверхности меньше 500 км, особенно поздно ночью и в период минимальной солнечной активности. Этот метод еще можно применять при условии, что p вычисляется для высоты отражающего слоя F, равной 220 км, а симомотивная сила V рассчитывается для соответствующего угла места.

Измерения, выполненные в Соединенных Штатах Америки, позволяют предположить, что рисунок 3 (часовой коэффициент потерь), по всей вероятности, точно отражает картину для частот около 1000 кГц в год низкой солнечной активности. При отклонении частоты от приблизительно 1000 кГц в ту или иную сторону, особенно в переходное время суток, могут возникнуть значительные ошибки. Из этих измерений также следует, что влияние солнечной активности гораздо сильнее сказывается через два часа, чем через шесть часов после захода Солнца. Таким образом, в год высокой солнечной

активности различие в значениях напряженности поля через шесть часов и через два часа после захода Солнца может быть значительно большим, чем это следует из рисунка 3.

Пространственные волны диапазона СЧ при распространении ночью в области средних широт имеют наибольшую интенсивность весной и осенью и наименьшую – летом и зимой, причем летний минимум выражается более отчетливо. Полное изменение может достигать 15 дБ на самых низких частотах СЧ диапазона, уменьшаясь до примерно 3 дБ на верхней его границе. На НЧ сезонное изменение ночью имеет противоположную тенденцию с четко выраженным летним максимумом. На тропических широтах сезонные вариации выражены заметно слабее.

Приложение 2

Распространение пространственных волн в дневное время

1 НЧ диапазон

На НЧ значения напряженности поля в дневное время на 7–45 дБ ниже, чем ночью. Это различие зависит от частоты, расстояния и времени года (см. также Рекомендацию МСЭ-R P.684).

2 СЧ диапазон

Имеющиеся данные свидетельствуют о том, что значения напряженности поля пространственной волны подвержены сезонным колебаниям, причем наиболее сильные колебания приходятся на зимний период. Средняя напряженность поля в зимние месяцы приблизительно на 10 дБ выше годовой медианы, а отношение значений напряженности поля зима/лето может превышать 30 дБ. Значение годовой медианы напряженности поля в дневное время приблизительно на 43 дБ ниже соответствующей величины, определяемой через шесть часов после захода Солнца. Величина напряженности поля, превышаемая в течение 10% общего количества дней в году, приблизительно на 13 дБ выше годовой медианы. См. также Справочник МСЭ-R – Ионосфера и ее влияние на распространение радиоволн.
