

Международный союз электросвязи

МСЭ-R

Сектор радиосвязи МСЭ

Рекомендация МСЭ-R Р.453-10
(02/2012)

**Индекс рефракции радиоволн:
его формула и данные о рефракции**

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 Приложении 1 к Резолюции 1 МСЭ-R. 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/en>, 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/en>.)

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	Подвижная спутниковая служба, спутниковая служба радиоопределения, любительская спутниковая 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 1 МСЭ-R.

Электронная публикация
Женева, 2012 г.

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R P.453-10

Индекс рефракции радиоволн: его формула и данные о рефракции

(Вопрос МСЭ-R 201/3)

(1970-1986-1990-1992-1994-1995-1997-1999-2001-2003-2012)

Сфера применения

В Рекомендации МСЭ-R P.453 представлены методы оценки индекса рефракции радиоволн и его поведения в разных местах по всему миру; приводится описание характеристик поверхности и вертикального профиля; а также представлены мировые карты распределения параметров рефракции и их статистическое отклонение.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая

- a) необходимость использования только одной формулы для расчета индекса рефракции атмосферы;
- b) потребность в эталонных данных о рефракции и градиентах рефракции по всему миру;
- c) необходимость математического метода описания статистического распределения градиентов рефракции,

рекомендует,

- 1** чтобы индекс рефракции радиоволн в атмосфере, n , вычислялся с помощью формулы, приведенной в Приложении 1;
- 2** чтобы использовались данные о рефракции, представленные на картах мира и мировых численных картах Приложения 1, за исключением тех случаев, когда имеются более надежные локальные данные;
- 3** чтобы при вычислении статистического распределения градиентов рефракции использовался метод, представленный в Приложении 1;
- 4** чтобы при отсутствии локальных данных о температуре и относительной влажности использовалась приведенная в п. 2.2. Приложения 1 мировая численная карта с указанием влажностной составляющей приповерхностной рефракции радиосигнала, которая превышает в течение 50% времени года (см. рисунок 3).

Приложение 1

1 Формула для вычисления индекса рефракции радиоволн

Индекс рефракции радиоволн в атмосфере, n , можно вычислить по следующей формуле:

$$n = 1 + N \times 10^{-6}, \quad (1)$$

где:

N : рефракция радиоволн, определяемая как:

$$N = N_{dry} + N_{wet} = \frac{77,6}{T} \left(P + 4\,810 \frac{e}{T} \right) \quad (\text{N-единиц}), \quad (2)$$

при этом составляющая рефракции радиоволн, учитывающая сухой воздух, N_{dry} , задается уравнением:

$$N_{dry} = 77,6 \frac{P}{T}, \quad (3)$$

а влажностная составляющая, N_{wet} , определяется как:

$$N_{wet} = 3,732 \times 10^5 \frac{e}{T^2}, \quad (4)$$

где:

P : атмосферное давление (гПа);

e : давление водяных паров (гПа);

T : абсолютная температура (К).

Это выражение можно использовать для всех радиочастот; на частотах до 100 ГГц ошибка не превышает 0,5%. В отношении характерных профилей температуры, давления и давления водяных паров см. Рекомендацию МСЭ-R P.835.

Для простоты расчетов соотношение между давлением водяных паров e и относительной влажностью можно представить как:

$$e = \frac{H \cdot e_s}{100}, \quad (5)$$

где:

$$e_s = EF \cdot a \cdot \exp \left[\frac{\left(b - \frac{t}{d} \right) \cdot t}{t + c} \right] \quad (6)$$

и:

$$EF_{water} = 1 + 10^{-4} \left[7,2 + P \cdot (0,00320 + 5,9 \cdot 10^{-7} \cdot t^2) \right]$$

$$EF_{ice} = 1 + 10^{-4} \left[2,2 + P \cdot (0,00382 + 6,4 \cdot 10^{-7} \cdot t^2) \right],$$

где:

- t : температура (°C);
 P : давление (гПа);
 H : относительная влажность (%);
 e_s : давление насыщенного пара (гПа) при температуре t (°C), а коэффициенты a , b , c и d следующие:

Для воды

$$a = 6,1121$$

$$b = 18,678$$

$$c = 257,14$$

$$d = 234,5$$

Для льда

$$a = 6,1115$$

$$b = 23,036$$

$$c = 279,82$$

$$d = 333,7$$

(справедливо в диапазоне от -40° до $+50^\circ$) (справедливо в диапазоне от -80° до 0°)

Давление водяных паров e получаем из плотности водяных паров ρ с использованием следующего уравнения:

$$e = \frac{\rho T}{216,7} \quad \text{гПа}, \quad (7)$$

где ρ выражено в г/м^3 . Типичные значения ρ приводятся в Рекомендации МСЭ-R P.836.

2 Приповерхностная рефракция и ее зависимость от высоты

2.1 Рефракция как функция от высоты

Было показано, что долгосрочная усредненная зависимость индекса рефракции n от высоты h хорошо определяется экспоненциальным законом:

$$n(h) = 1 + N_0 \times 10^{-6} \times \exp(-h/h_0), \quad (8)$$

где:

N_0 : среднее значение атмосферной рефракции, экстраполированное для уровня моря;

h_0 : приведенная высота (км).

Значения N_0 и h_0 для различных климатических условий можно определить статистическими методами. В качестве эталона можно использовать усредненный в глобальных масштабах высотный профиль рефракции, определяемый как:

$$N_0 = 315$$

$$h_0 = 7,35 \text{ км.}$$

Эти численные значения применимы только для наземных трасс.

Этот эталонный профиль можно использовать для вычисления значения рефракции N_s у поверхности Земли по значению N_0 следующим образом:

$$N_s = N_0 \exp(-h_s/h_0), \quad (9)$$

где:

h_s : высота поверхности Земли над уровнем моря (км).

Вместе с тем следует отметить, что контуры, представленные на рисунках 1 и 2, были получены с использованием значения $h_0 = 9,5$ км. Рисунки 1 и 2 были получены на основе набора данных, собранных за 5 лет (1955–1959 гг.) приблизительно от 1000 станций, расположенных на поверхности Земли. (Рисунки 1 и 2 отсутствуют в численной форме.)

Для трасс Земля-спутник индекс рефракции на любой высоте вычисляется с помощью уравнений (1), (2) и (7), выше, при соответствующих значениях параметров, приведенных в Рекомендации МСЭ-R P.835, Приложение 1. Полученные таким образом индексы рефракции можно далее использовать для численного моделирования траекторий лучей в атмосфере.

(Следует отметить, что экспоненциальный профиль, приведенный в уравнении (9), можно также использовать для получения быстрых приблизительных оценок градиента рефракции вблизи поверхности Земли и видимого угла направления максимума излучения, как указано в п. 4.3 Рекомендации МСЭ-R P.834.)

2.2 Влажностная составляющая поверхностной рефракции

На рисунке 3 для удобства ссылки изображены медианные значения (50%) влажностной составляющей приповерхностной рефракции, превышаемой в течение обычного года. В файле данных ESANWET.TXT содержатся численные данные.

Влажностная составляющая приповерхностной рефракции была получена на основе данных инициализации (1992–1993 гг.) численного прогноза погоды Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF).

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Файл данных ESANWET.TXT имеет разрешение $1,5^\circ$ по широте и долготе. Дополнительные файлы данных ESALAT.TXT и ESALON.TXT содержат, соответственно, значения широты и долготы соответствующих записей (узлы координатной сети) в файле данных ESANWET.TXT.

Данные расположены в интервале от 0° до 360° по долготе и от $+90^\circ$ до -90° по широте. Для мест, не совпадающих с узлами координатной сетки, влажностную составляющую рефракции в требуемом месте можно получить путем билинейной интерполяции по значениям в четырех ближайших узлах координатной сетки.

Файлы данных можно получить в Бюро радиосвязи (БР).

РИСУНОК 1
Среднемесячные значения N_0 : февраль

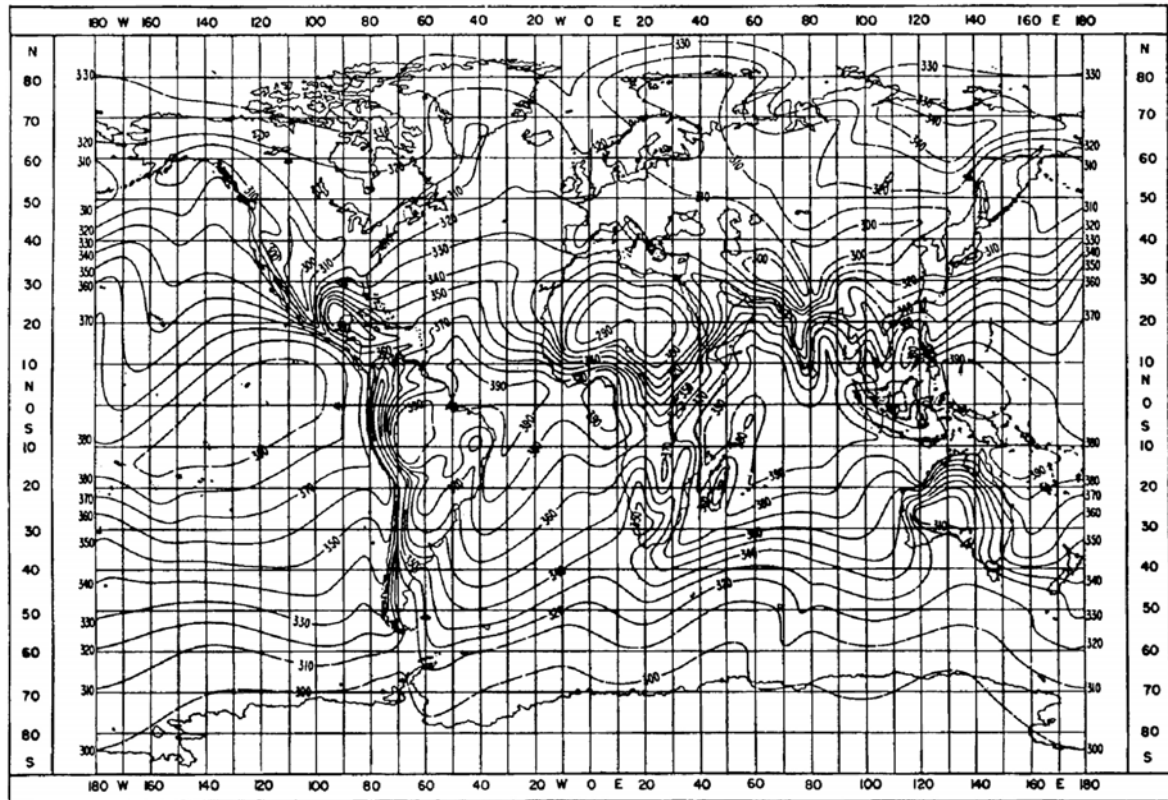


РИСУНОК 2

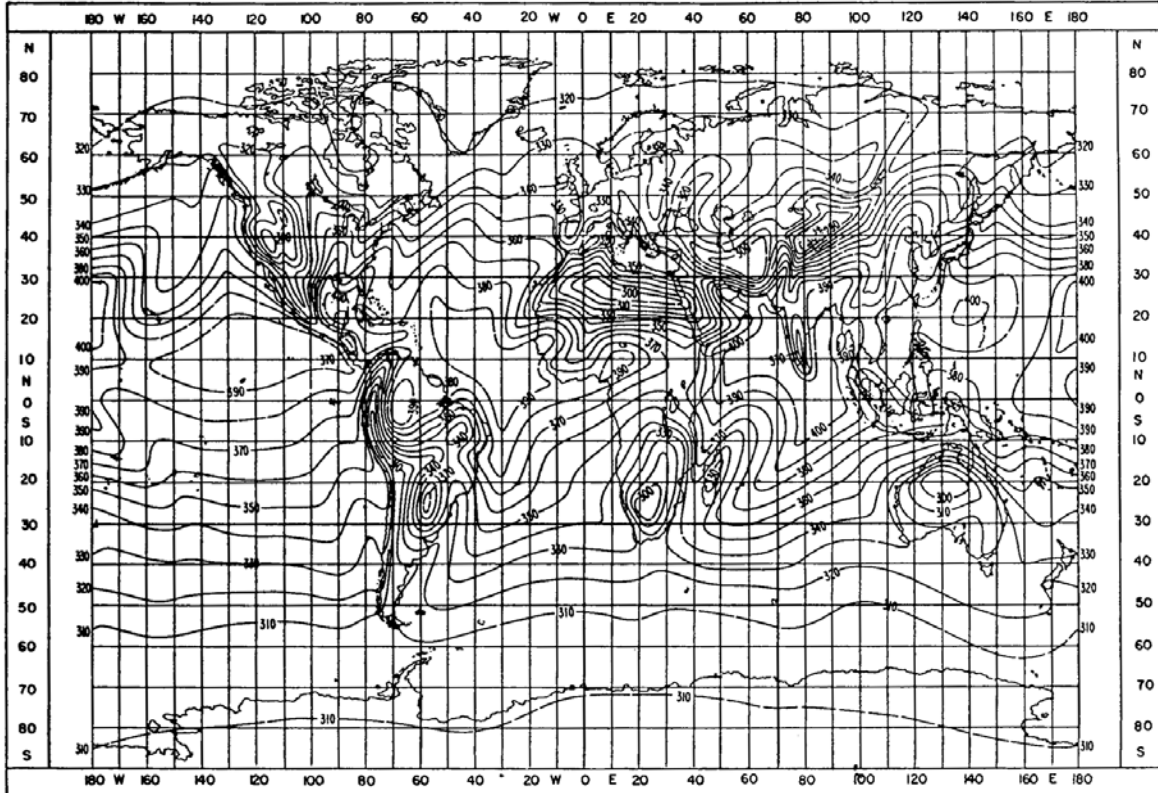
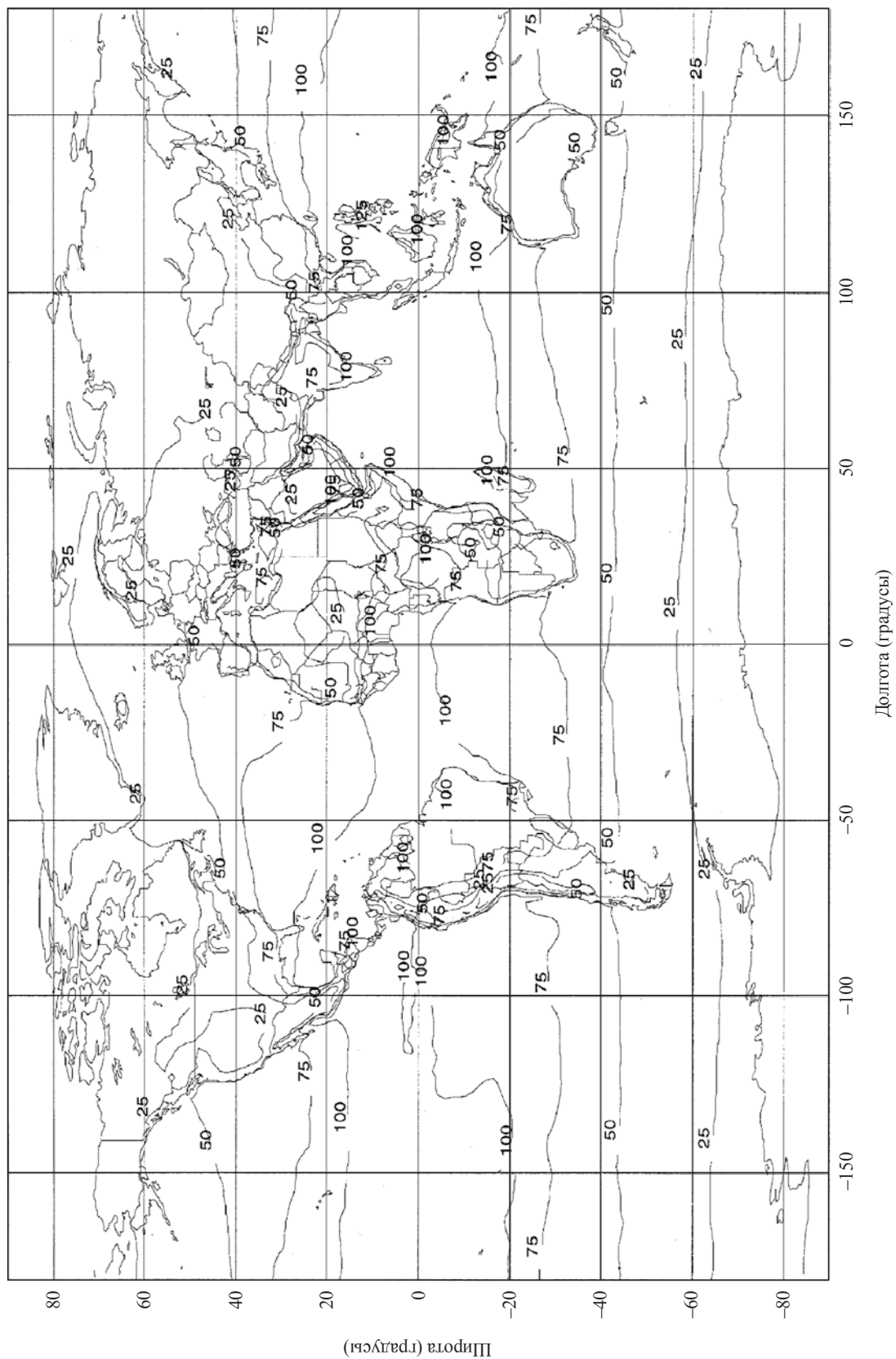
Среднемесячные значения N_0 : август

РИСУНОК 3

Влажностная составляющая приповерхностной рефракции (миллионных долей),
превышаемая в течение 50% времени года



3 Вертикальные градиенты рефракции

Статистические данные о вертикальном градиенте рефракции радиоволн в нижних слоях атмосферы являются важными параметрами при оценке просвета на трассе и явлений распространения радиоволн, таких как волноводное распространение на загоризонтных трассах, отражение от поверхности и замирания и искажения из-за многолучевости на наземных линиях прямой видимости.

3.1 В пределах первого километра атмосферы

На рисунках 4–7 представлены изоплеты уменьшения (т. е. падения) среднемесячных значений рефракции радиоволн в пределах слоя толщиной 1 км от поверхности Земли. Изменение рефракции радиоволн, ΔN , рассчитывалось по формуле:

$$\Delta N = N_s - N_1, \quad (10)$$

где N_1 – значение рефракции на высоте 1 км над поверхностью Земли. Значения ΔN не приводились к эталонной поверхности. Рисунки 4–7 были получены на основе набора данных, собранных за 5 лет (1955–1959 гг.) от 99 станций запуска радиозондов. (Рисунки 4–7 отсутствуют в численной форме.)

3.2 В нижних слоях атмосферы

Статистические данные о градиенте рефракции в пределах нижних 100 м над поверхностью Земли используются для оценки вероятности возникновения волноводного и многолучевого распространения. В том случае, если отсутствуют более надежные локальные данные, такую статистику во всемирном масштабе можно получить из графиков на рисунках 8–11, которые были получены на основе набора данных, собранных за 5 лет (1955–1959 гг.) от 99 станций запуска радиозондов. (Рисунки 8–11 отсутствуют в численной форме.)

На рисунках 12–16 для удобства ссылки изображен градиент рефракции в пределах нижних 65 м атмосферы, dN_1 . В файлах данных DNDZ_хх.TXT содержатся численные данные, показанные на этих рисунках.

Градиент рефракции был получен на основе собранных за два года (1992–1993 гг.) данных инициализации (четыре раза в день) численного прогноза погоды ECMWF.

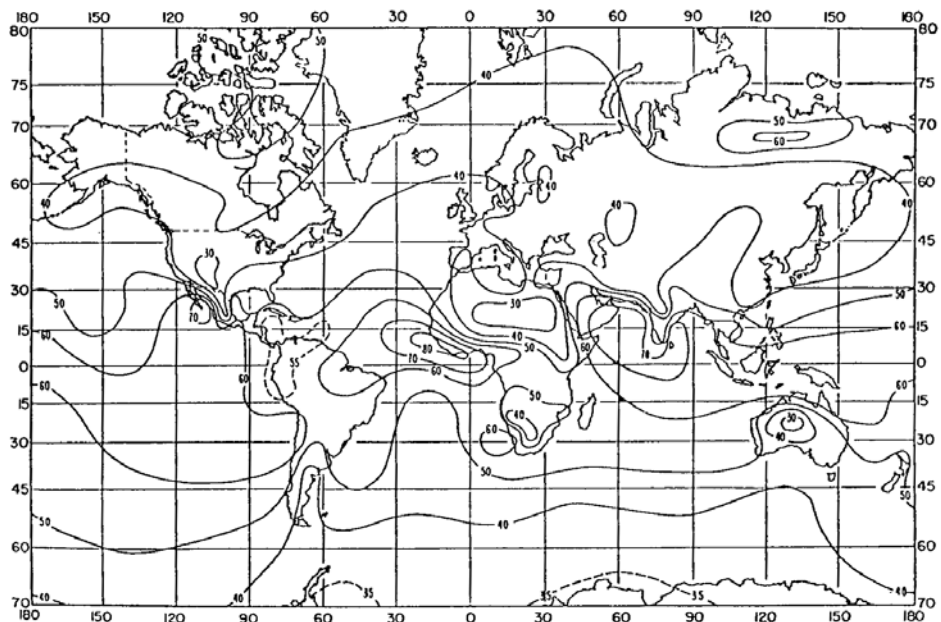
ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Файл данных DNDZ_хх.TXT имеет разрешение 1,5° по широте и долготе. Дополнительные файлы данных DNDZLAT.TXT и DNDZLON.TXT содержат, соответственно значения широты и долготы соответствующих записей (узлов координатной сетки) в файле данных DNDZ_хх.TXT.

Данные расположены в интервале от 0° до 360° по долготе и от +90° до –90° по широте. Для мест, не совпадающих с узлами координатной сетки, градиент рефракции в требуемом месте можно получить путем билинейной интерполяции по значениям в четырех ближайших узлах координатной сетки.

Файлы данных можно получить в БР.

РИСУНОК 4

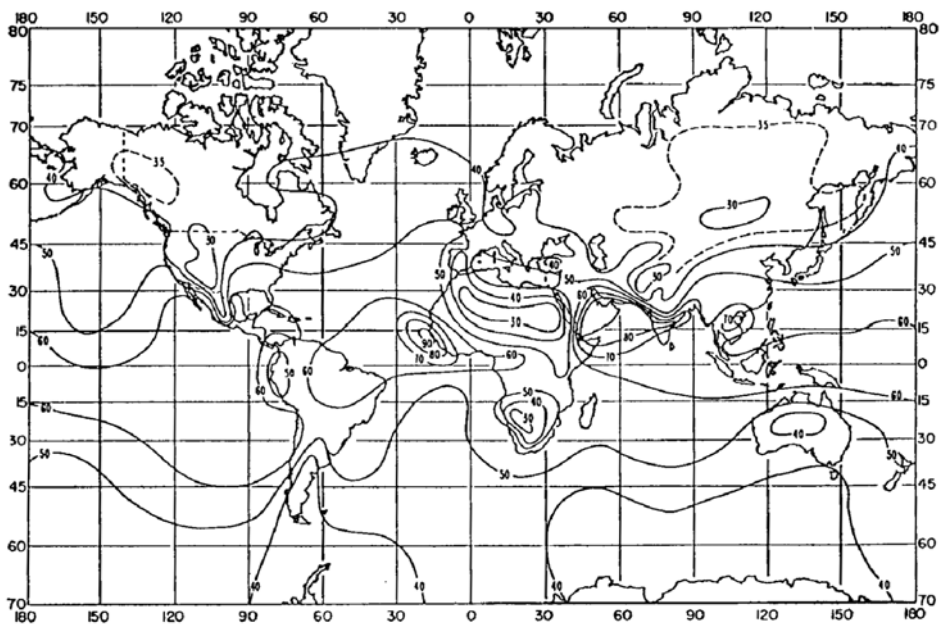
Среднемесячные значения ΔN : февраль



P.0453-04

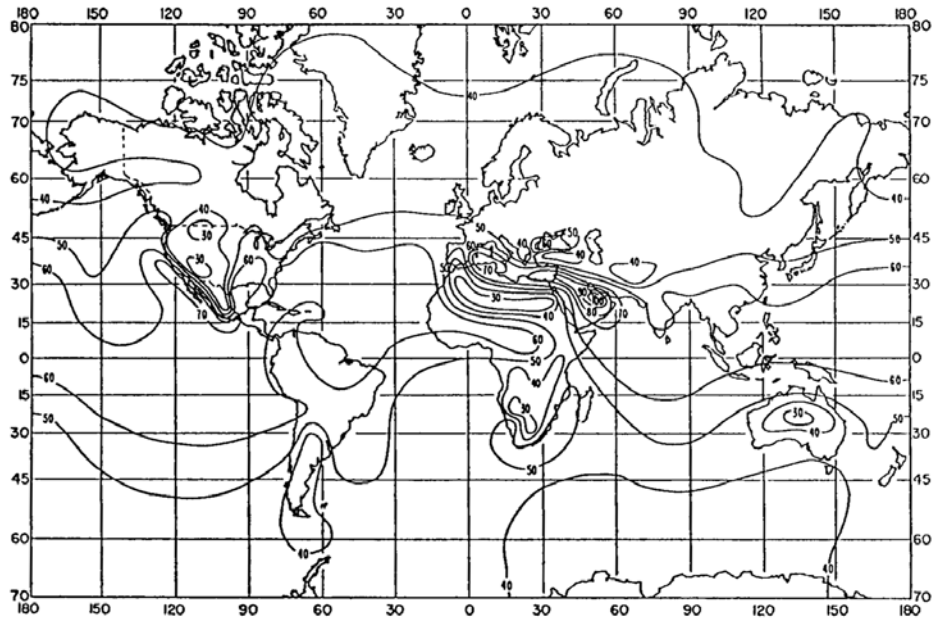
РИСУНОК 5

Среднемесячные значения ΔN : май



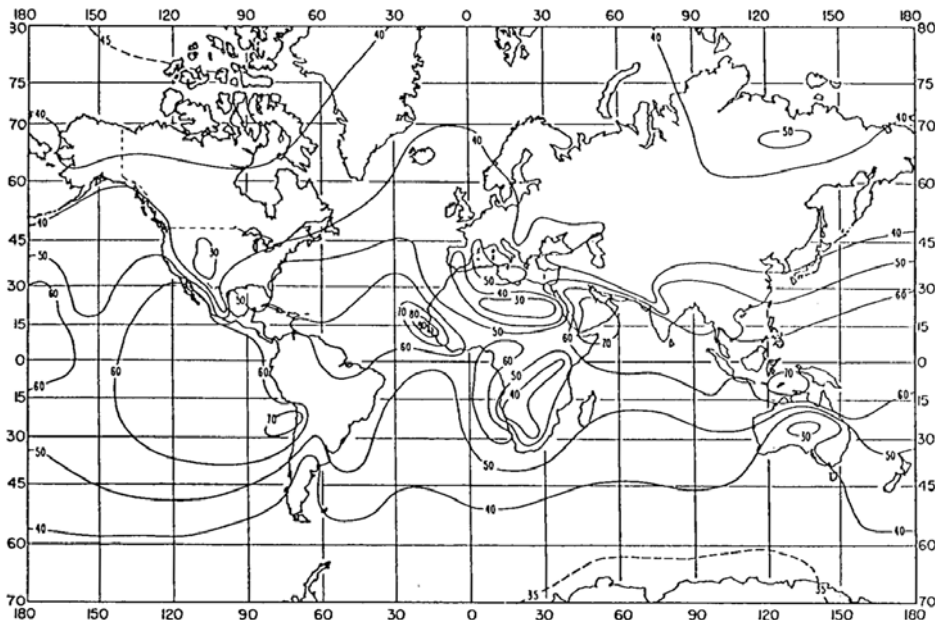
P.0453-05

РИСУНОК 6

Среднемесячные значения ΔN : август

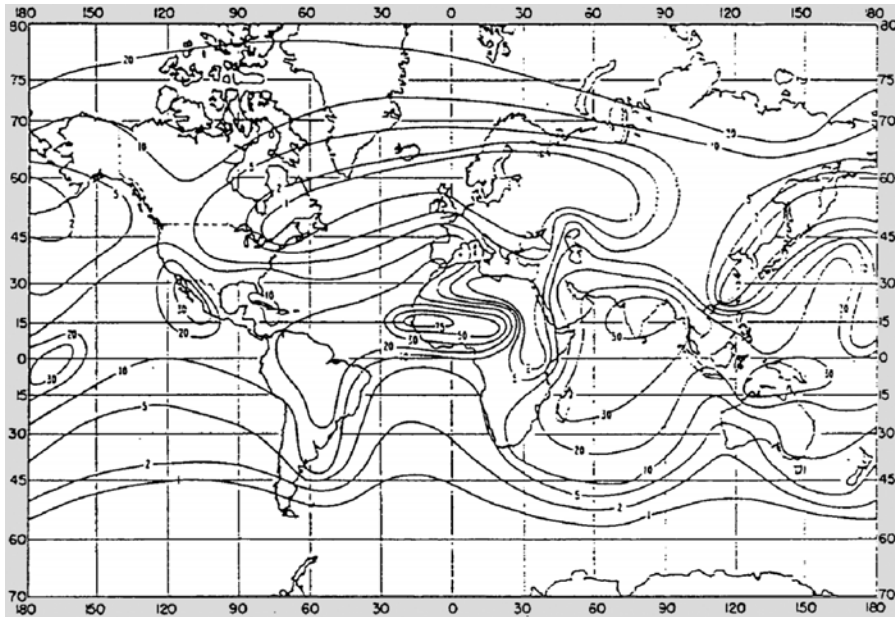
P.0453-06

РИСУНОК 7

Среднемесячные значения ΔN : ноябрь

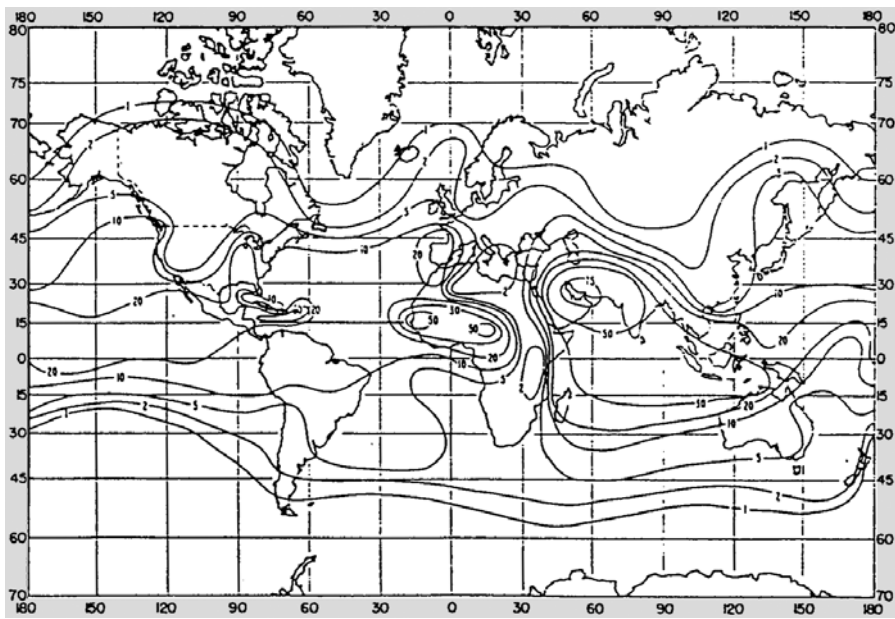
P.0453-07

РИСУНОК 8

Процент времени, для которого градиент ≤ -100 (N-единиц/км): февраль

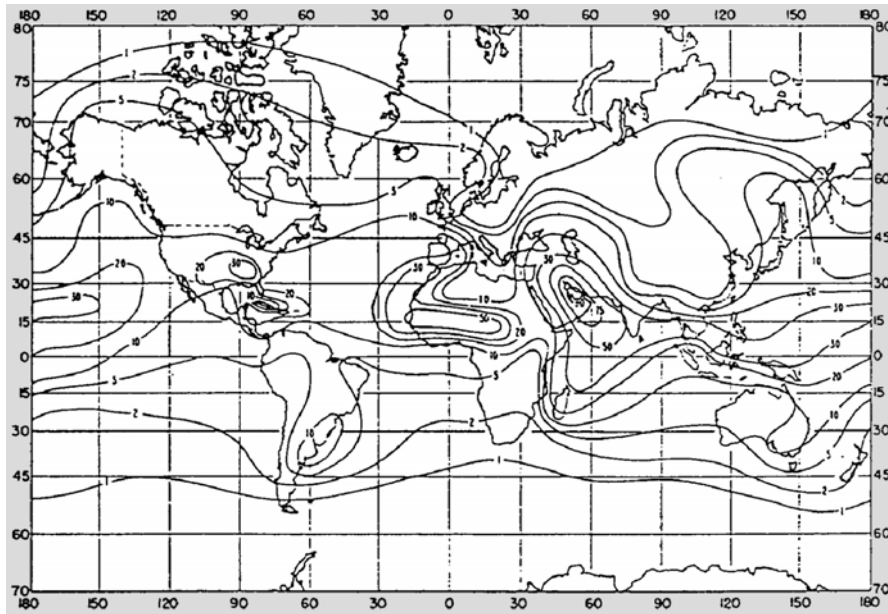
P.0453-08

РИСУНОК 9

Процент времени, для которого градиент ≤ -100 (N-единиц/км): май

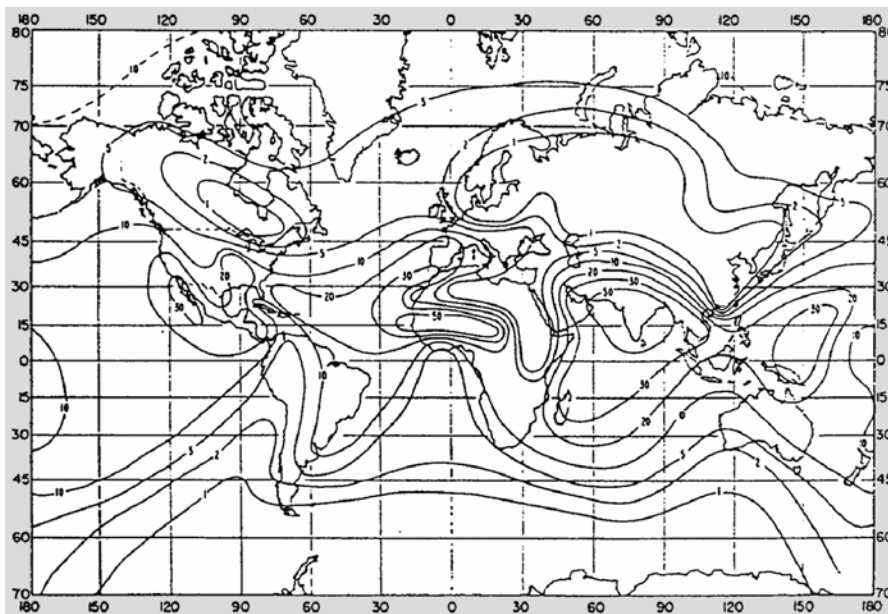
P.0453-09

РИСУНОК 10

Процент времени, для которого градиент ≤ -100 (N-единиц/км): август

P.0453-10

РИСУНОК 11

Процент времени, для которого градиент ≤ -100 (N-единиц/км): ноябрь

P.0453-11

РИСУНОК 12

Градиент рефракции, не превышаемый в течение 1% времени обычного года на нижних 65 м

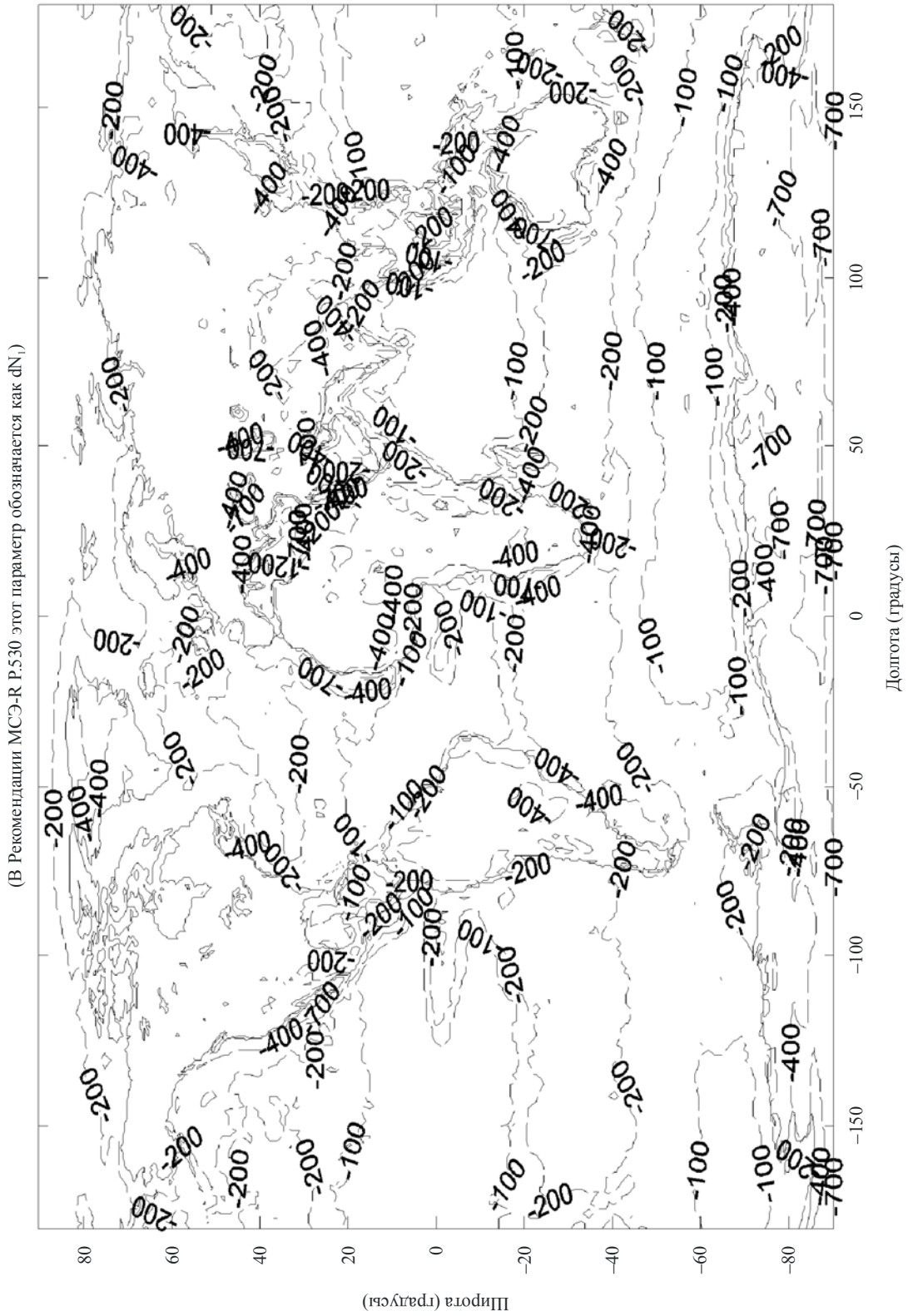
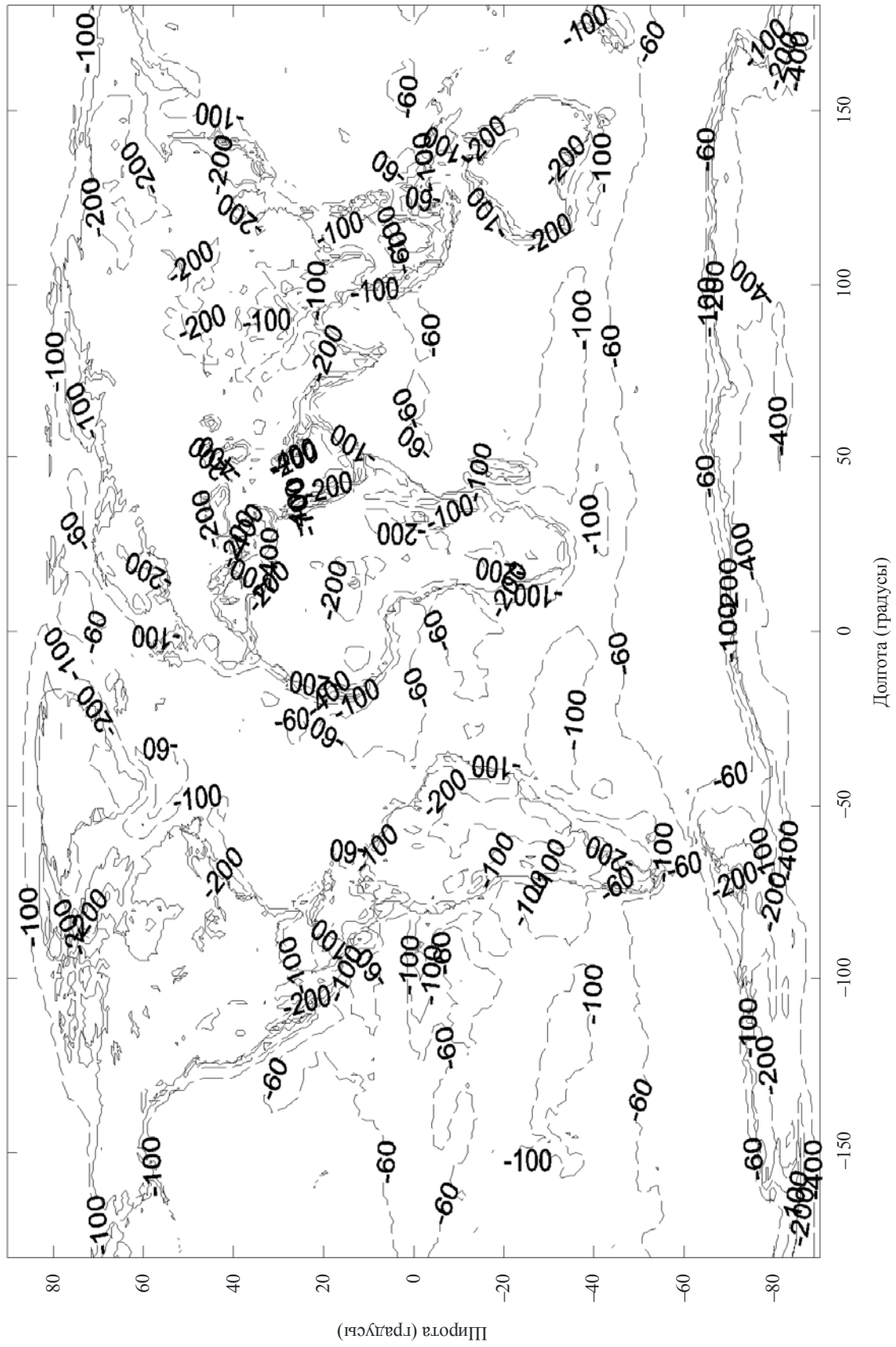


РИСУНОК 13

Градиент рефракции, не превышаемый в течение 10% времени обычного года на нижних 65 м



P0453-13

РИСУНОК 14

Градиент рефракции, не превышаемый в течение 50% времени обычного года на нижних 65 м

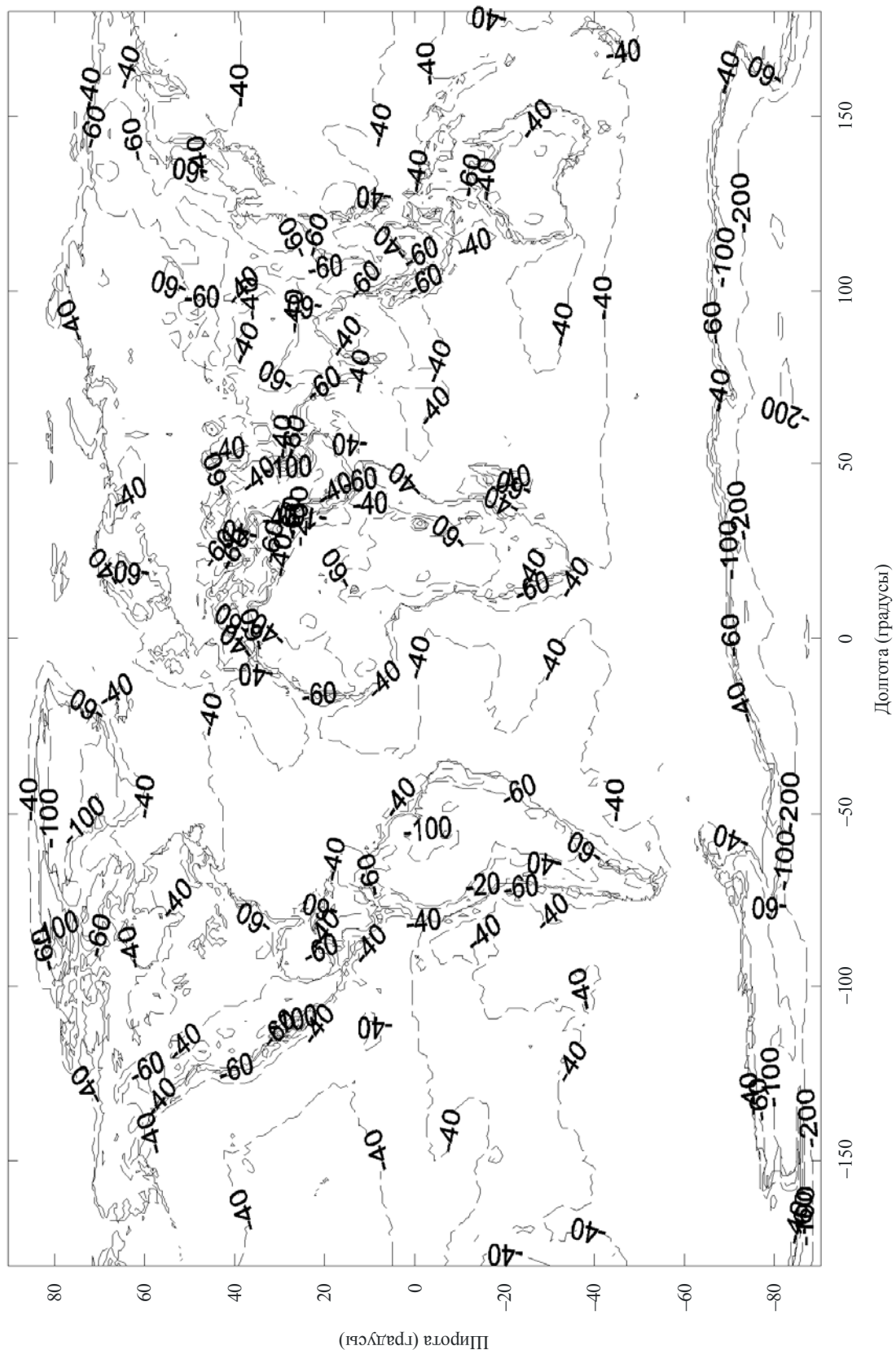
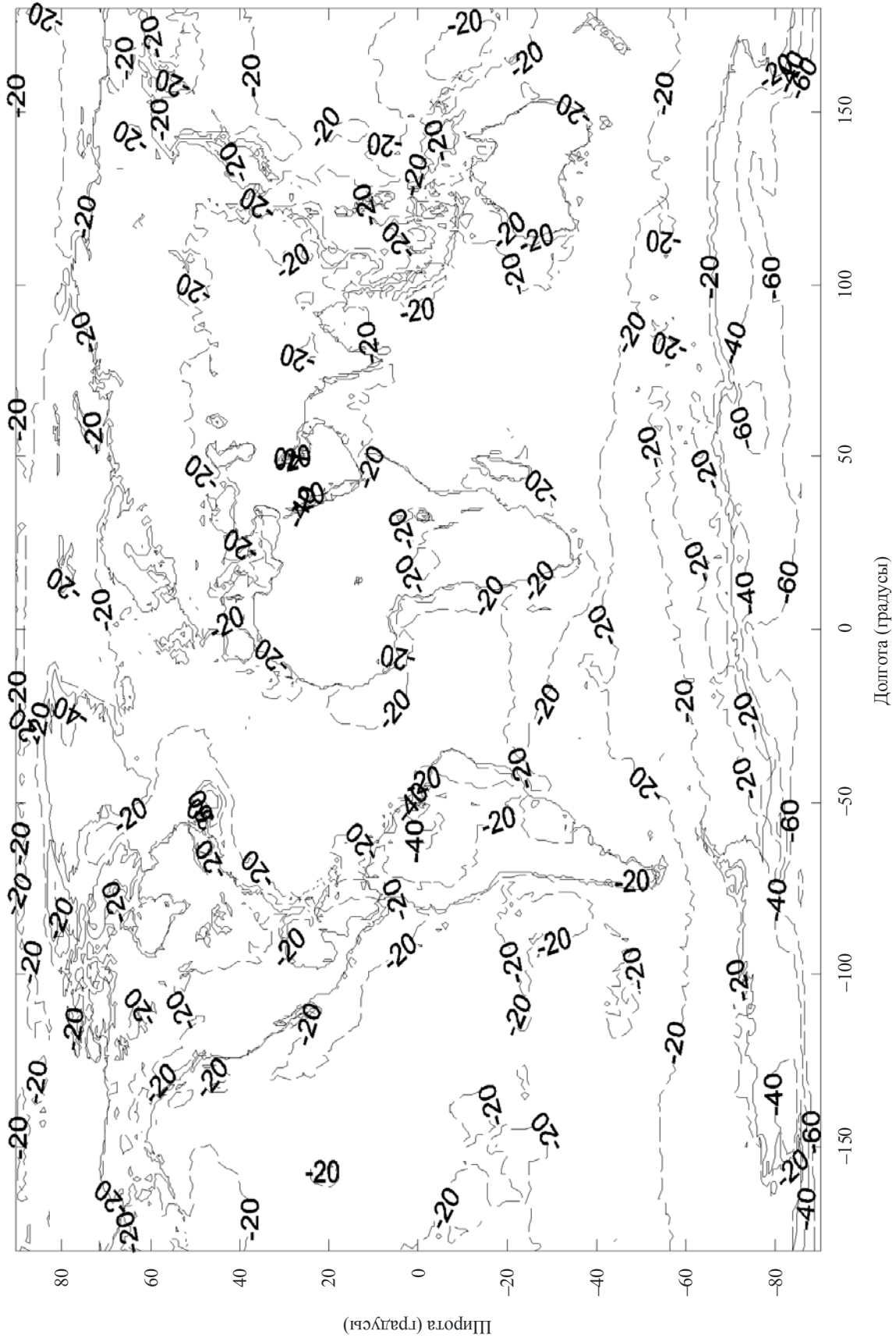


РИСУНОК 15

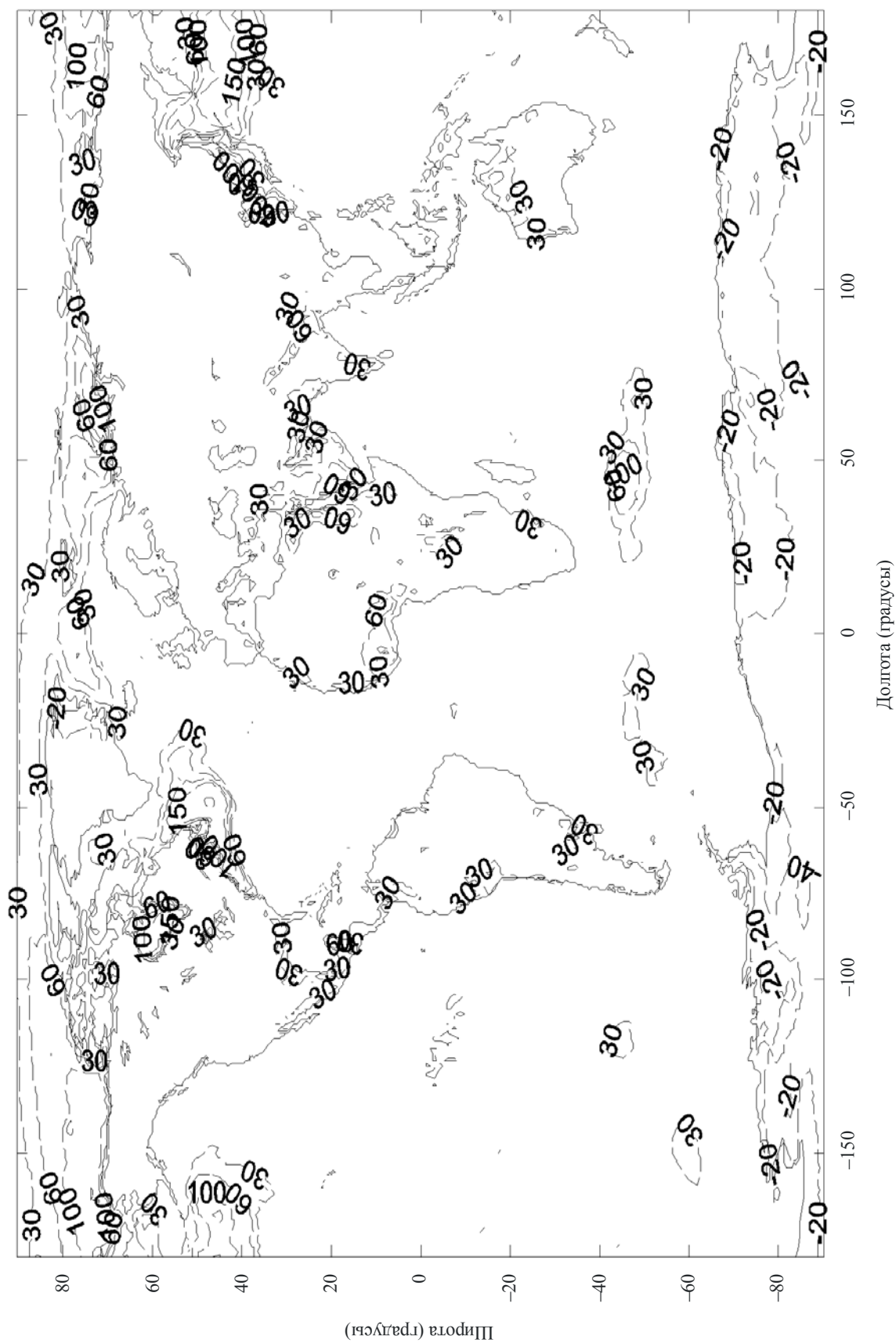
Градиент рефракции, не превышаемый в течение 90% времени обычного года на нижних 65 м



P.0453-1.5

РИСУНОК 16

Градиент рефракции, не превышаемый в течение 99% времени обычного года на нижних 65 м



P.0453-16

4 Статистическое распределение градиентов рефракции

Полное статистическое распределение градиентов рефракции вблизи поверхности Земли в пределах нижних 100 м атмосферы можно оценить на основе медианного значения Med градиента рефракции и значения рефракции на уровне земли, N_s , для рассматриваемого места.

Медианное значение, Med , распределения градиента рефракции можно вычислить, зная вероятность, P_0 , того, что градиент рефракции остается меньше или равен D_n , с помощью следующего выражения:

$$Med = \frac{D_n + k_1}{(1/P_0 - 1)^{1/E_0}} - k_1, \quad (11)$$

где:

$$E_0 = \log_{10} (|D_n|);$$

$$k_1 = 30.$$

Уравнение (11) справедливо в интервале -300 N-единиц/км $\leq D_n \leq -40$ N-единиц/км. Если для исследуемого места вероятность P_0 , соответствующая любому заданному значению градиента рефракции D_n , неизвестна, то P_0 можно получить с помощью карт мира, приведенных на рисунках 8–11, где показан процент времени, в течение которого градиент рефракции в пределах нижних 100 м атмосферы остается меньше или равен -100 N-единиц/км.

В случае если более надежные локальные данные не доступны, N_s можно получить с помощью мировых карт рефракции на уровне моря, N_0 , представленных на рисунках 1 и 2, и уравнения (9).

Для $D_n \leq Med$, кумулятивную вероятность D_n , P_1 , можно получить из уравнения:

$$P_1 = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{|D_n - Med|}{B} + k_2 \right) k_3 \right]^{E_1}}, \quad (12)$$

где:

$$B = \left| \frac{0,3 Med - N_s + 210}{2} \right|$$

$$E_1 = \log_{10}(F + 1)$$

$$F = \frac{2 \times |D_n - Med|}{\left(\frac{B}{67} \right)^{6,5} + 1}$$

$$k_2 = \frac{1,6B}{120}$$

$$k_3 = \frac{120}{B}$$

Уравнение (12) справедливо для значений $Med > 120$ N-единиц/км и для интервала -300 N-единиц/км $< D_n < 50$ N-единиц/км.

Для $D_n > Med$, кумулятивная вероятность D_n, P_2 , рассчитывается по формуле:

$$P_2 = 1 - \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{|D_n - Med|}{B} + k_2 \right) k_4 \right]^{E_1}}, \quad (13)$$

где:

$$B = \left| \frac{0,3 Med - N_s + 210}{2} \right|$$

$$E_1 = \log_{10}(F + 1)$$

$$F = \frac{2 \times |D_n - Med|}{\left(\frac{B}{67} \right)^{6,5} + 1}$$

$$k_4 = \left[\frac{100}{B} \right]^{2,4}.$$

Уравнение (13) справедливо для значений $Med > -120$ N-единиц/км и для интервала -300 N-единиц/км $< D_n < 50$ N-единиц/км.

5 Приповерхностные и приподнятые волноводы

Атмосферные волноводы могут вызывать глубокие медленные замирания, серьезное усиление сигнала и замирания из-за многолучевости на наземных линиях прямой видимости, а также причинять значительные помехи на загоризонтных трассах. В связи с этим интерес представляет описание процесса возникновения волноводов и их структуры. В этом разделе приводятся статистические данные, которые были получены на основе наблюдений, проводившихся в течение 20 лет (1977–1996 гг.) с помощью радиозондов на 661 станции запуска.

Волноводы описываются через измененную рефракцию, определяемую как:

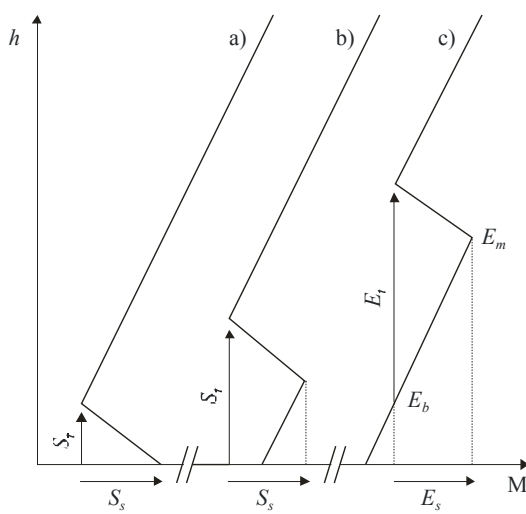
$$M(h) = N(h) + 157h \quad (\text{М-единиц}), \quad (14)$$

где h (км) – высота.

На рисунке 17 изображена измененная рефракция как функция высоты над уровнем земли и приведены определения типов волноводов. Волноводы могут быть трех типов: приповерхностные, промежуточные и приподнятые. В связи с малочисленностью случаев возникновения промежуточных волноводов по сравнению с приповерхностными волноводами, статистические данные были получены путем объединения этих двух типов в одну группу, называемую приповерхностными волноводами. Эти волноводы характеризуются интенсивностью, S_s (М-единиц) или E_s (М-единиц), и толщиной, S_t (м) или E_t (м). Для описания характеристик приподнятых волноводов используются два дополнительных параметра, а именно: высота нижней границы волновода, E_b (м), и высота в пределах волновода с максимальным значением M , E_m (м).

РИСУНОК 17

Определение параметров, описывающих а) приповерхностные, б) промежуточные и с) приподнятые волноводы



P.0453-17

На рисунках 18–25 для удобства ссылки представлены данные, которые содержатся в файлах данных, упомянутых в подписях к этим рисункам. Статистические данные по приповерхностным и промежуточным волноводам были объединены в связи с малочисленностью случаев возникновения промежуточных волноводов.

Данные расположены в интервале от 0° до 360° по долготе и от $+90^\circ$ до -90° по широте с разрешением $1,5^\circ$. Для мест, не совпадающих с узлами координатной сетки, интересующие параметры в требуемом месте можно получить путем билинейной интерполяции по значениям в четырех ближайших узлах координатной сетки.

Файлы данных можно получить в БР.

РИСУНОК 18

Название файла: S_OCCURRENCE.TXT

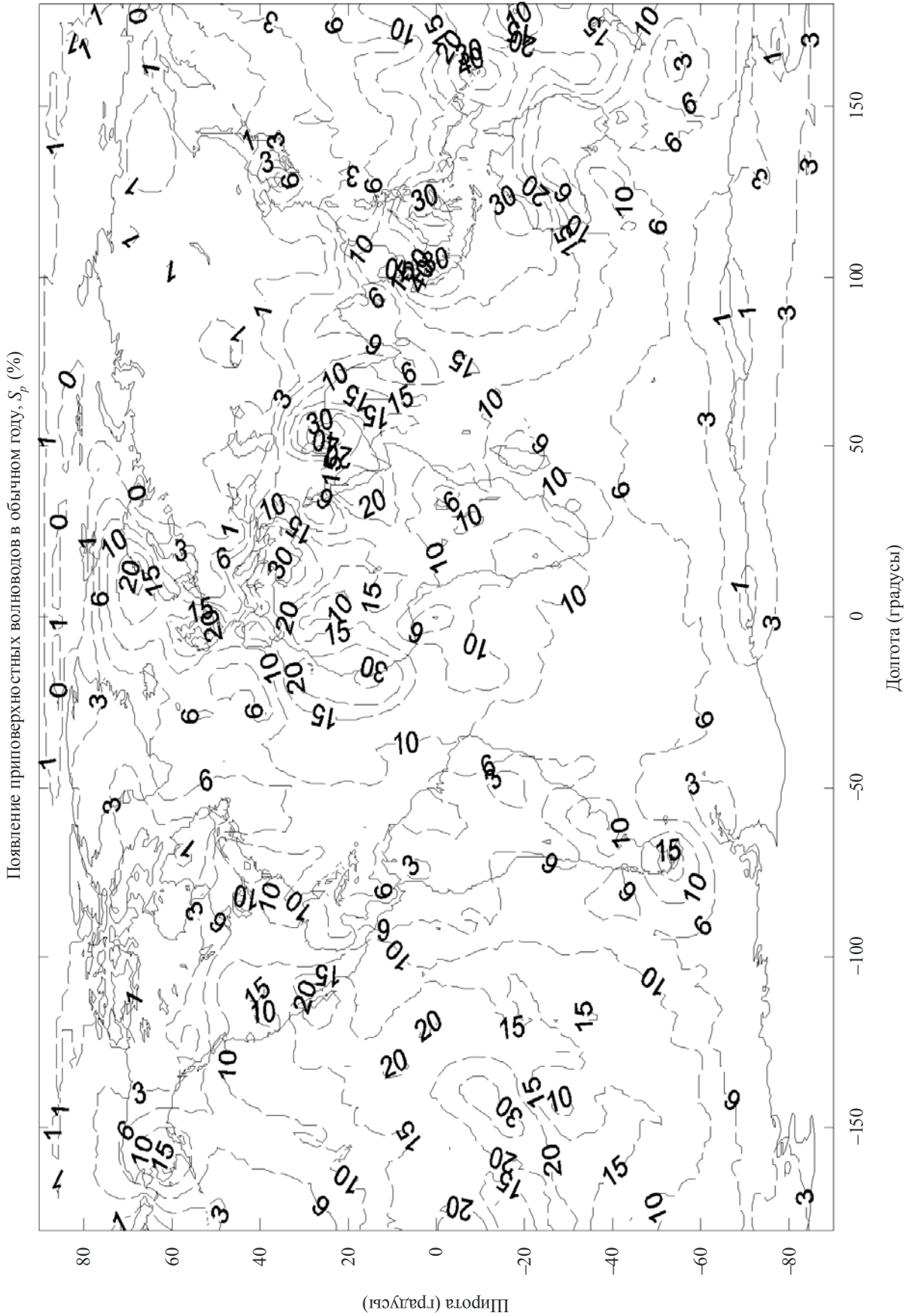
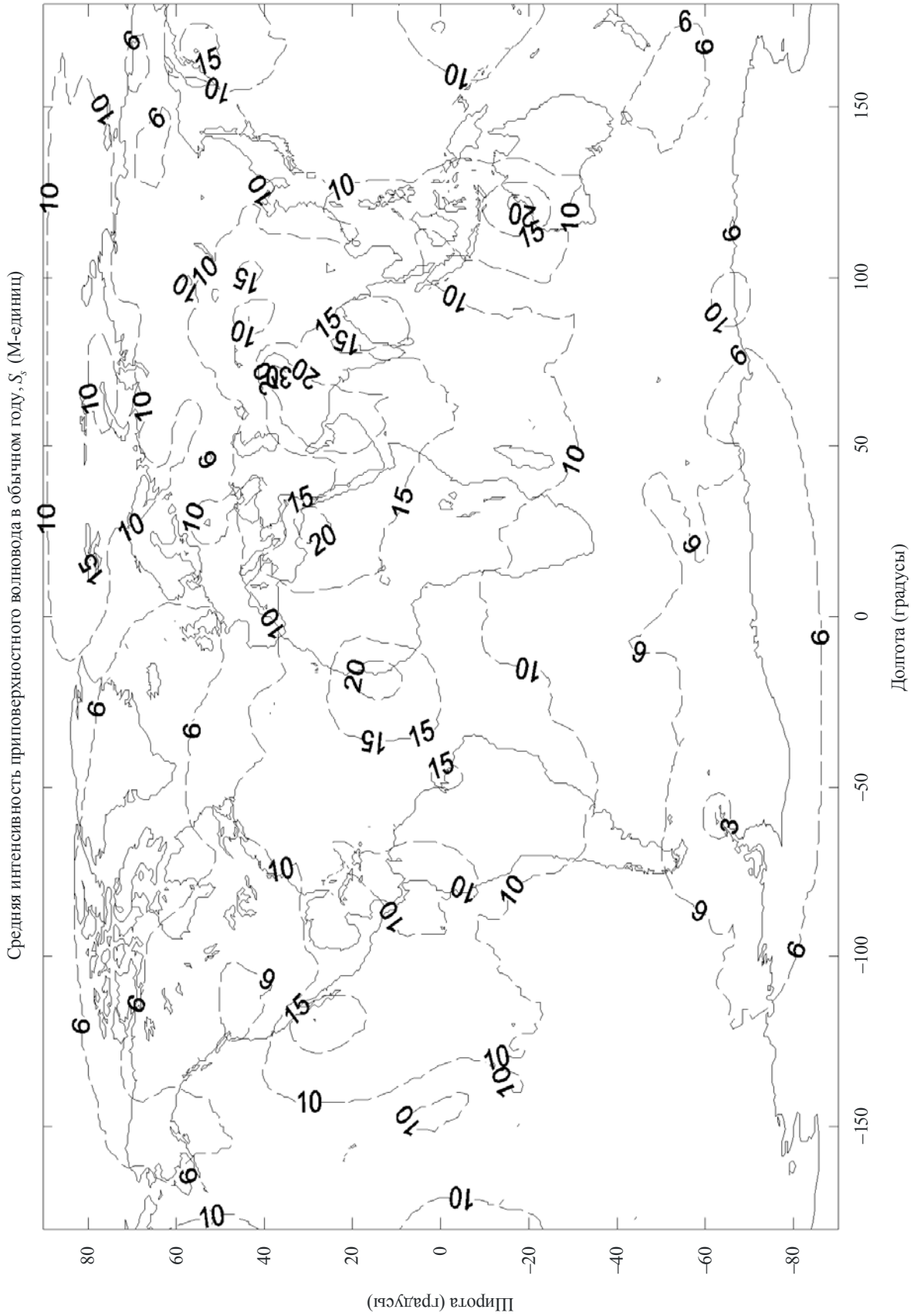


РИСУНОК 19

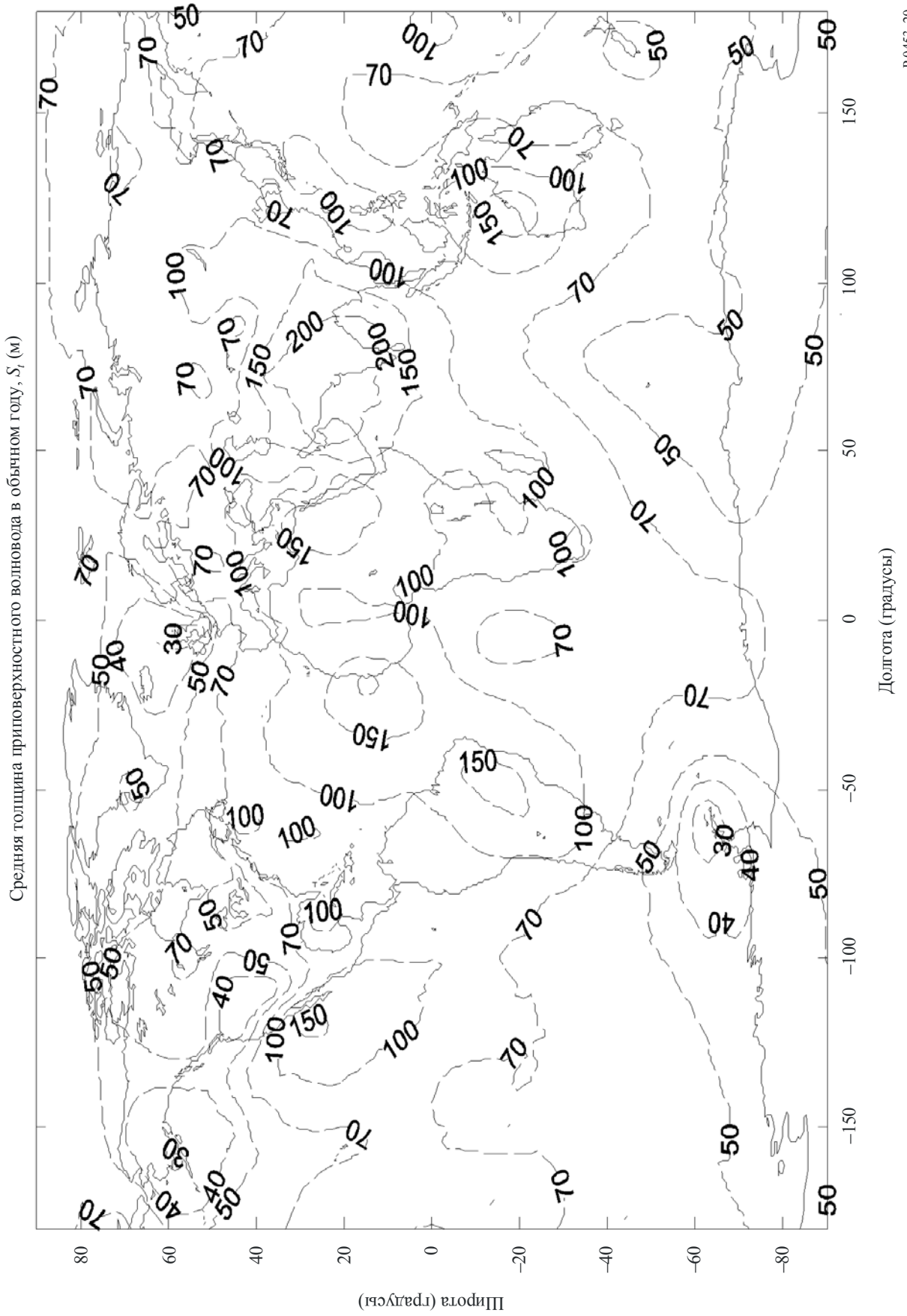
Название файла: S_STRENGTH.TXT



P.0453-19

РИСУНОК 20

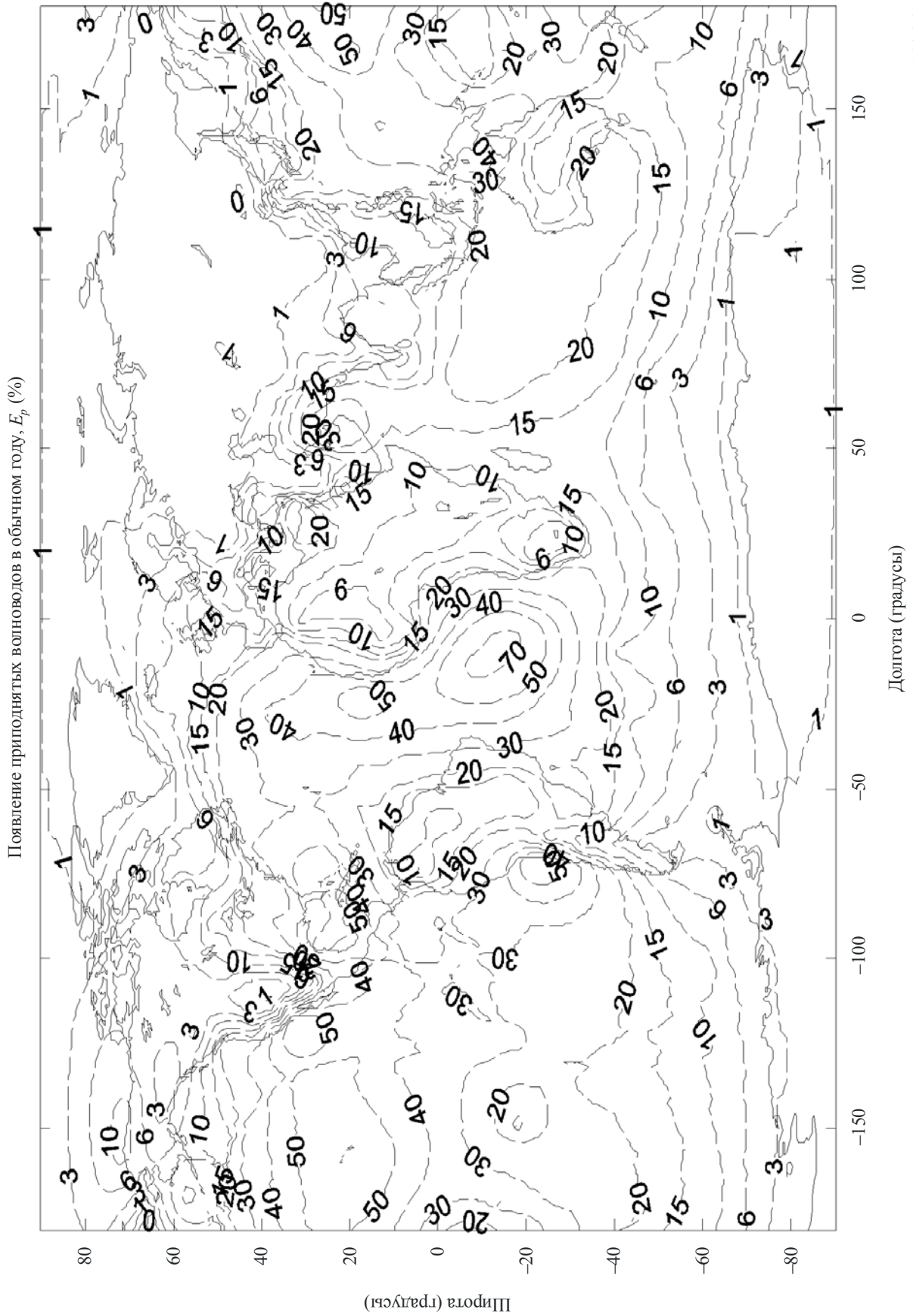
Название файла: S_THICKNESS.TXT



P.0453-20

РИСУНОК 21

Название файла: E_OCCURRENCE.TXT

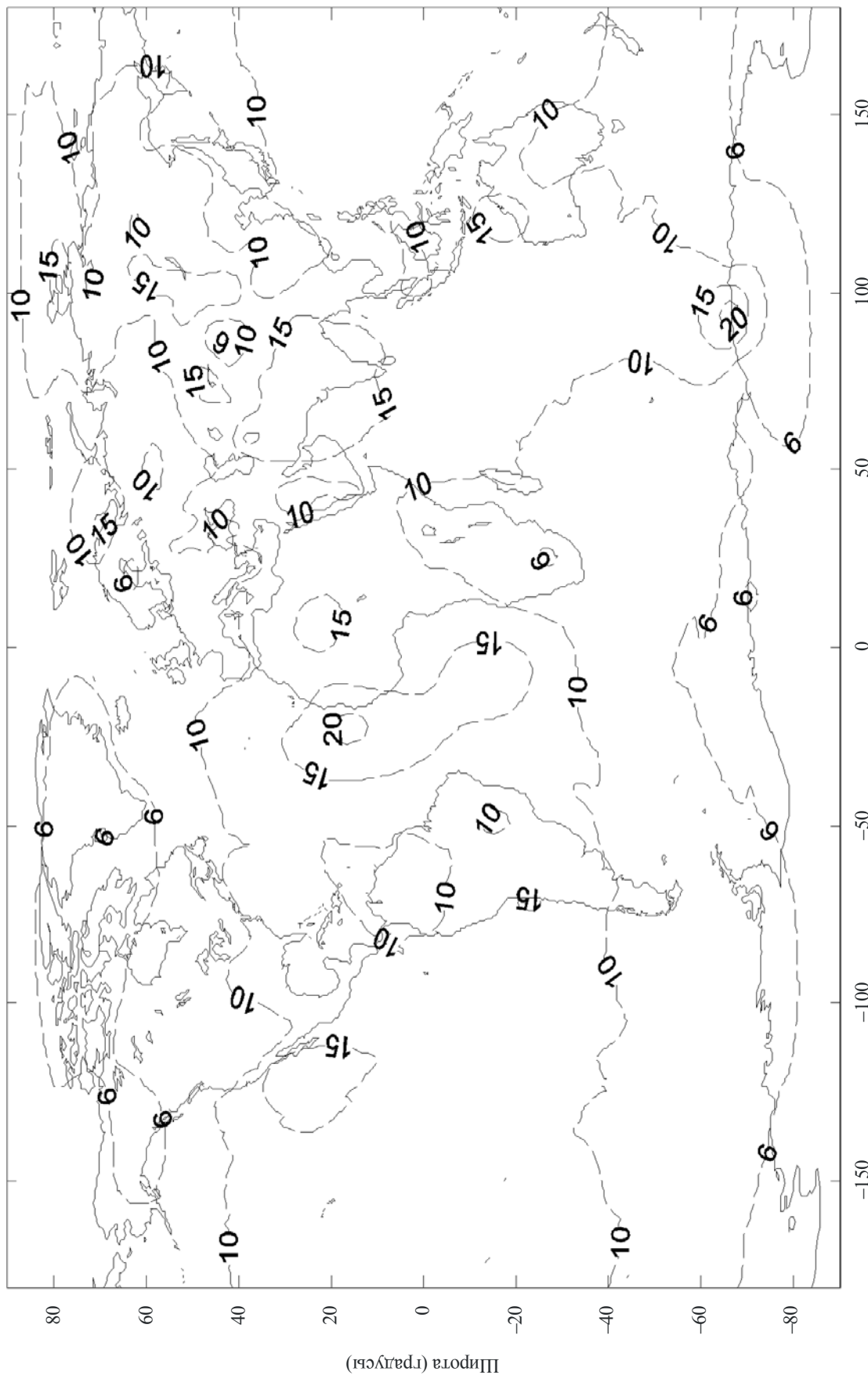


P0453-21

РИСУНОК 22

Название файла: E_STRENGTH.TXT

Средняя интенсивность пригодного волнового в обычном году, E_s (М-единиц)



Долгота (градусы)

P.0453-22

РИСУНОК 23

Название файла: E_THICKNESS.TXT

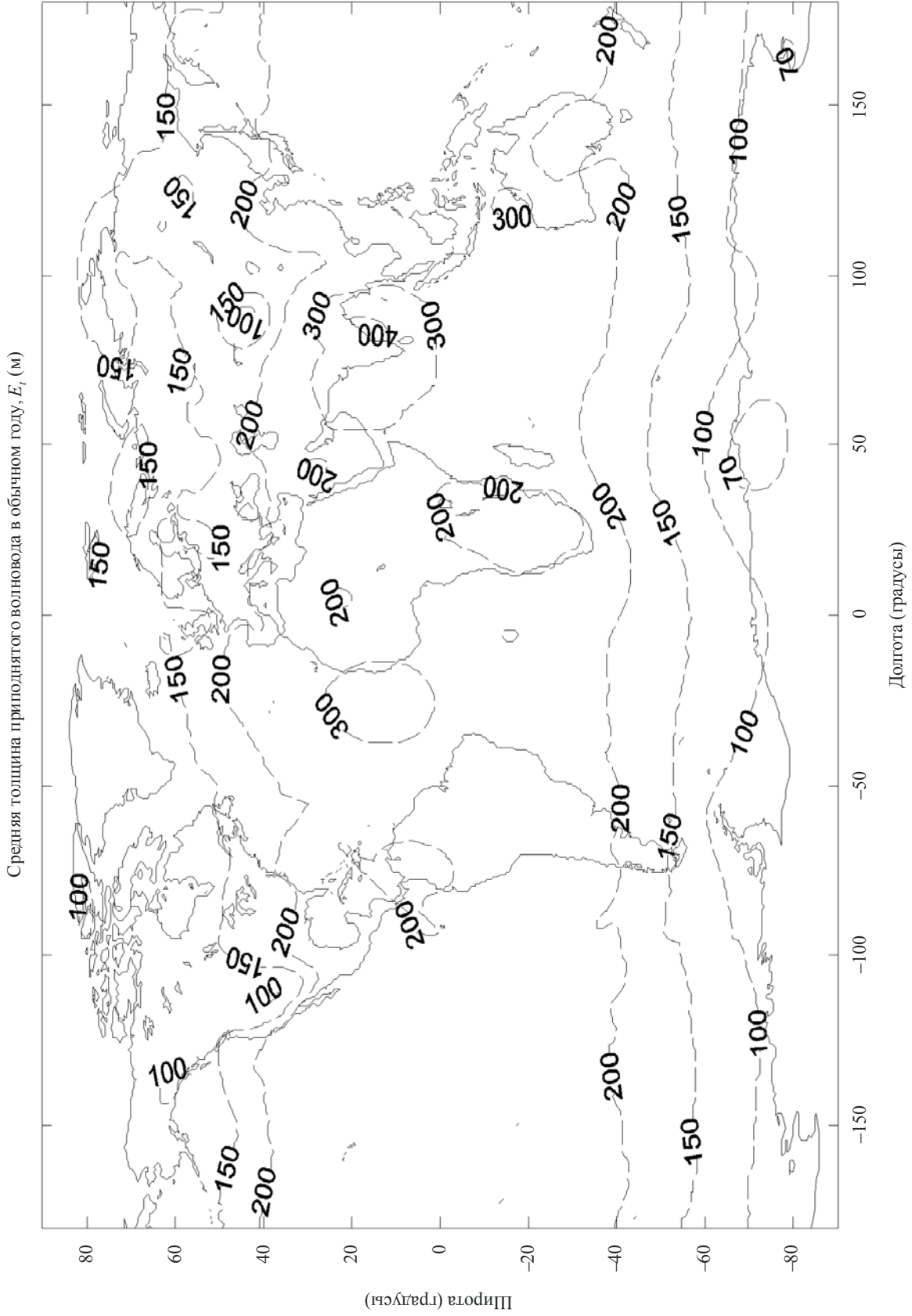


РИСУНОК 24

Название файла: E_BASE.TXT

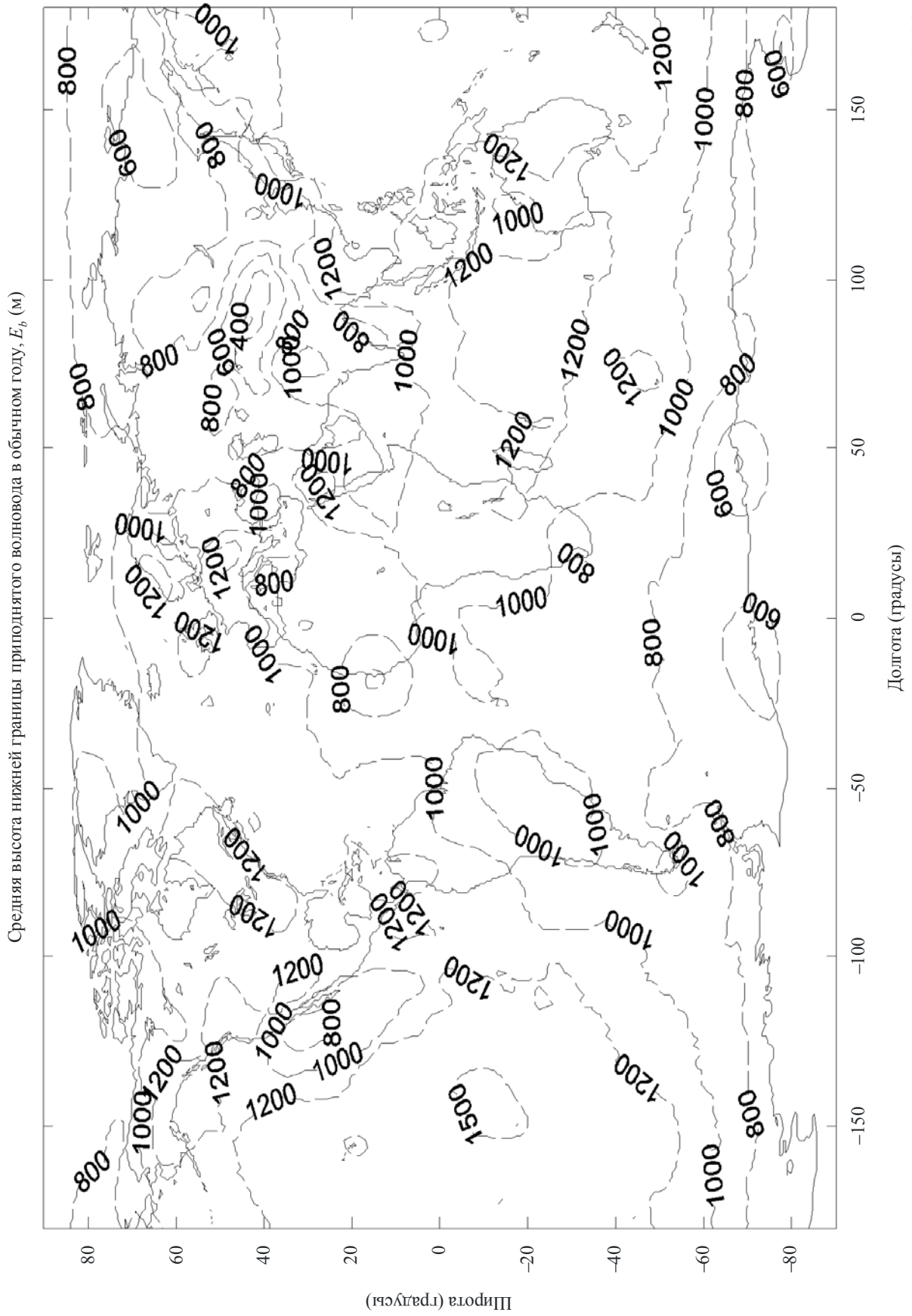
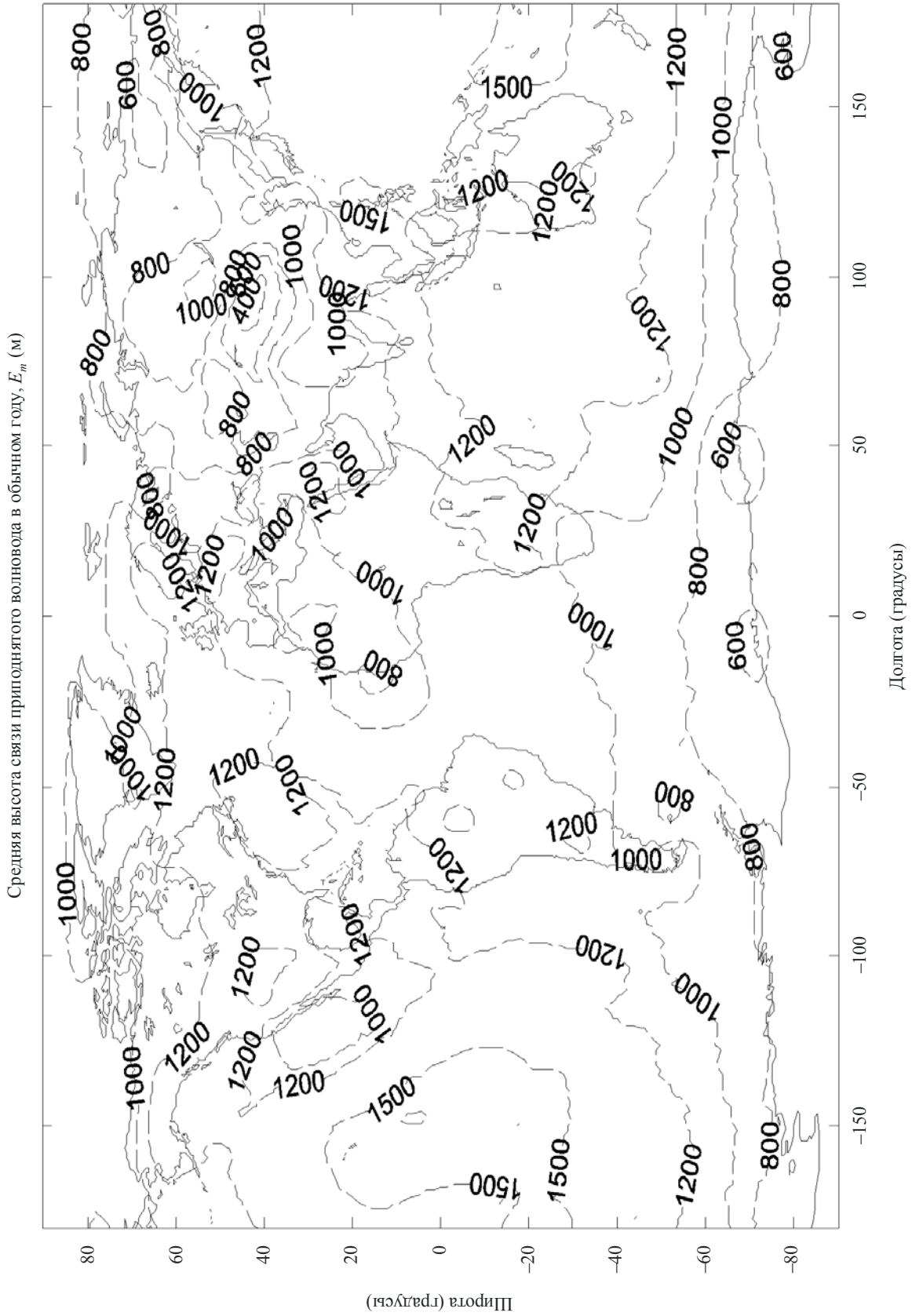


РИСУНОК 25

Название файла: E_MAX_M.TXT



P.0453-2.5