

# МСЭ-R

Сектор радиосвязи МСЭ

**Рекомендация МСЭ-R P.453-12**

(09/2016)

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

**Серия Р**

**Распространение радиоволн**



## 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 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/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
<b>BO</b>	Спутниковое радиовещание
<b>BR</b>	Запись для производства, архивирования и воспроизведения; пленки для телевидения
<b>BS</b>	Радиовещательная служба (звуковая)
<b>BT</b>	Радиовещательная служба (телевизионная)
<b>F</b>	Фиксированная служба
<b>M</b>	Подвижные службы, служба радиоопределения, любительская служба и относящиеся к ним спутниковые службы
<b>P</b>	<b>Распространение радиоволн</b>
<b>RA</b>	Радиоастрономия
<b>RS</b>	Системы дистанционного зондирования
<b>S</b>	Фиксированная спутниковая служба
<b>SA</b>	Космические применения и метеорология
<b>SF</b>	Совместное использование частот и координация между системами фиксированной спутниковой службы и фиксированной службы
<b>SM</b>	Управление использованием спектра
<b>SNG</b>	Спутниковый сбор новостей
<b>TF</b>	Передача сигналов времени и эталонных частот
<b>V</b>	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, 2017 г.

© ITU 2017

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.453-12

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

(Вопрос МСЭ-R 201/3)

(1970-1986-1990-1992-1994-1995-1997-1999-2001-2003-2012-2015-2016)

**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.

**Ключевые слова**

Индекс рефракции радиоволн, поверхность, вертикальный профиль, параметры рефракции, 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 рефракция радиоволн,  $N$ , равна:

$$N = 77,6 \frac{P_d}{T} + 72 \frac{e}{T} + 3,75 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (\text{N-единиц}), \quad (2)$$

составляющая рефракции радиоволн, учитывающая сухой воздух,  $N_{dry}$ , равна:

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

а составляющая рефракции радиоволн, учитывающая влажный воздух,  $N_{wet}$ , равна:

$$N_{wet} = 72 \frac{e}{T} + 3,75 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (4)$$

где:

$P_d$ : атмосферное давление сухого воздуха (гПа);

$P$ : общее атмосферное давление (гПа);

$e$ : давление водяных паров (гПа);

$T$ : абсолютная температура (К);

и

$$P = P_d + e. \quad (5)$$

Поскольку  $P_d = P - e$ , уравнение (2) может быть представлено в следующем виде:

$$N = 77,6 \frac{P}{T} - 5,6 \frac{e}{T} + 3,75 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (6)$$

Уравнение (6) может аппроксимироваться с меньшей точностью в следующем виде:

$$N = \frac{77,6}{T} \left( P + 4810 \frac{e}{T} \right) \quad (7)$$

Уравнение (7) дает значения  $N$  в пределах 0,02 процента от значения, полученного из уравнения (2), для диапазона температур от  $-50^\circ\text{C}$  до  $+40^\circ\text{C}$ . 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:

$$e = \frac{H \cdot e_s}{100}, \quad (8)$$

где:

$$e_s = EF \cdot a \cdot \exp \left[ \frac{\left( b - \frac{t}{d} \right) \cdot t}{t + c} \right] \quad (9)$$

и:

$$EF_{\text{вода}} = 1 + 10^{-4} \left[ 7,2 + P \cdot (0,0320 + 5,9 \cdot 10^{-6} \cdot t^2) \right]$$

$$EF_{\text{лед}} = 1 + 10^{-4} \left[ 2,2 + P \cdot (0,0383 + 6,4 \cdot 10^{-6} \cdot t^2) \right]$$

где:

- $t$ : температура (°C);  
 $P$ : общее атмосферное 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  $-40^\circ$  до  $+50^\circ$ ) (справедливо в диапазоне от  $-80^\circ$  до  $0^\circ$ )

$P$  определено как общее атмосферное давление, однако может использоваться значение давления сухого атмосферного воздуха, и точность прогнозирования при этом ухудшается незначительно.

Давление водяных паров  $e$  получаем из плотности водяных паров  $\rho$  с использованием следующего уравнения:

$$e = \frac{\rho T}{216,7} \quad \text{гПа}, \quad (10)$$

где  $\rho$  выражено в г/м<sup>3</sup>. Типичные значения  $\rho$  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:

$$n(h) = 1 + N_0 \times 10^{-6} \times \exp(-h/h_0), \quad (11)$$

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:

$$N_s = N_0 \exp(-h_s/h_0), \quad (12)$$

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 (10), 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 (12), 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  $0^\circ$  до  $360^\circ$  по долготе и от  $+90^\circ$  до  $-90^\circ$  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 №: февраль

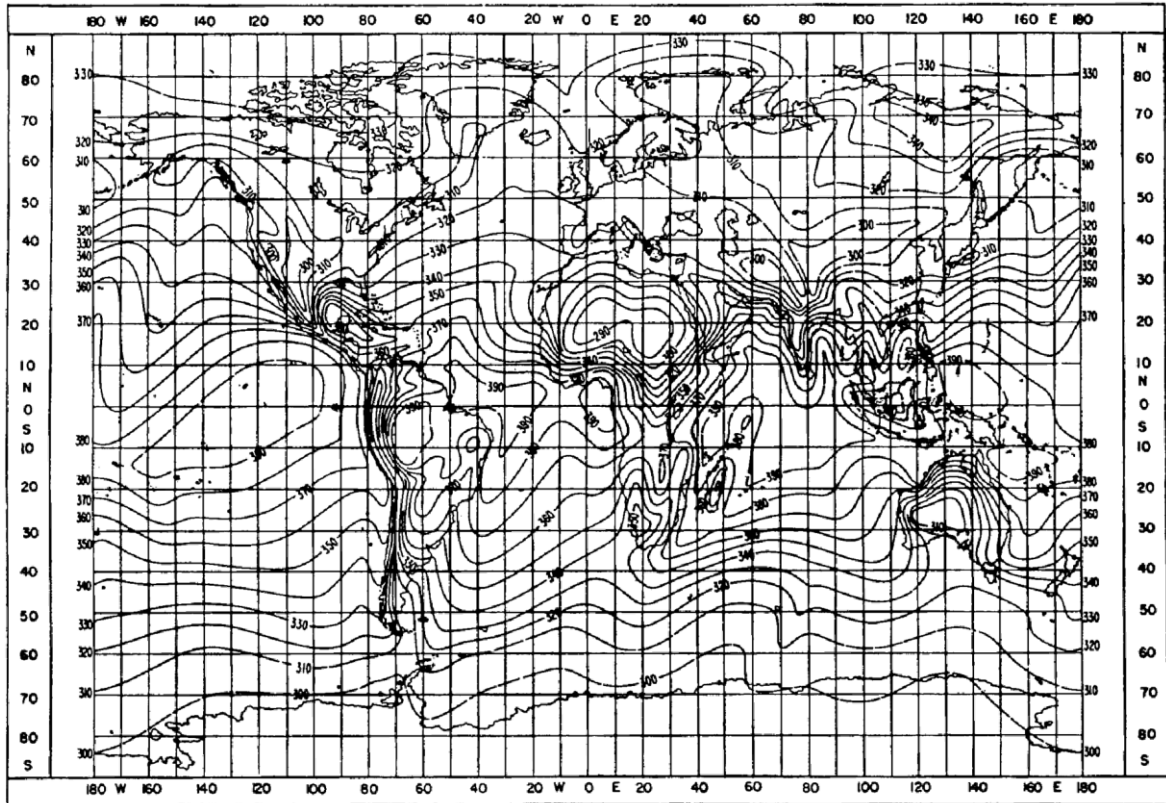


РИСУНОК 2

Среднемесячные значения №: август

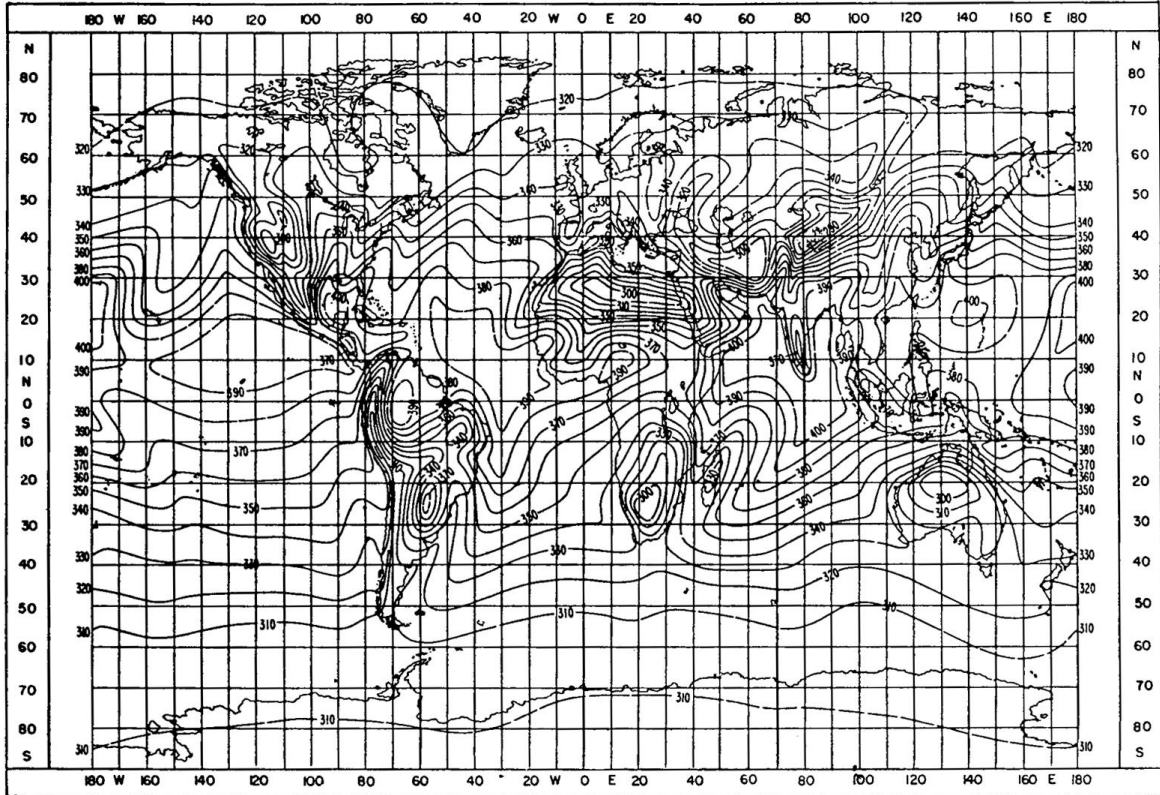
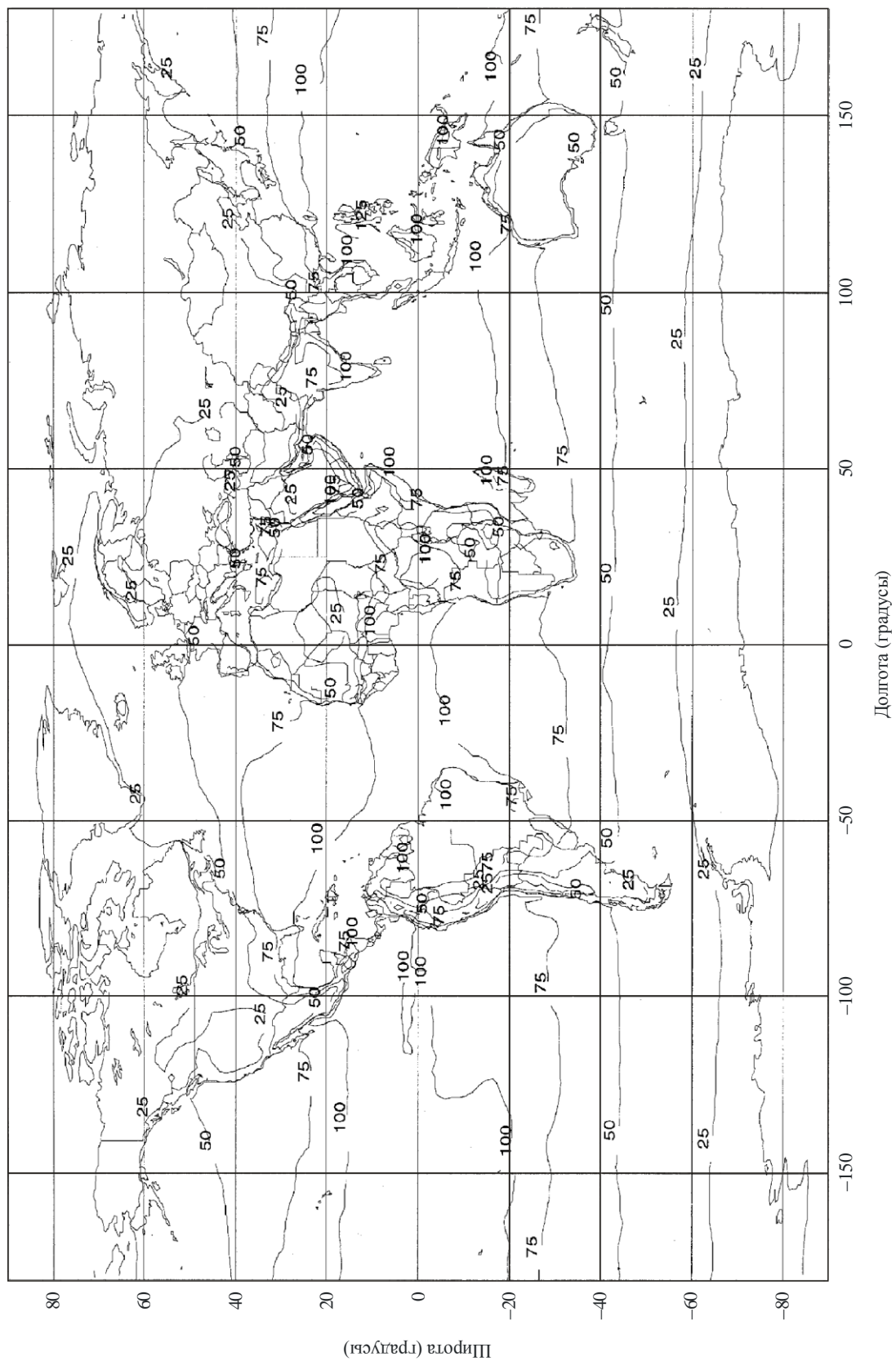




РИСУНОК 3

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



P0453-03

### 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,  $\Delta N$ , рассчитывалось по формуле:

$$\Delta N = N_s - N_1, \quad (13)$$

где  $N_1$  – значение рефракции на высоте 1 км над поверхностью Земли. Значения  $\Delta N$  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.)

Кроме того, годовые значения  $\Delta N$ , превышаемые для 0,1, 0,2, 0,5, 1, 2, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 95, 98, 99, 99,5, 99,8, 99,9% времени среднего года, являются неотъемлемой частью настоящей Рекомендации и доступны в форме цифровых карт, а также представлены в Добавлении. Месячные значения  $\Delta N$ , превышаемые для 0,1, 0,2, 0,5, 1, 2, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 95, 98, 99, 99,5, 99,8, 99,9% времени среднего месяца, являются неотъемлемой частью настоящей Рекомендации и доступны в форме цифровых карт, а также представлены в Добавлении.

#### 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.)

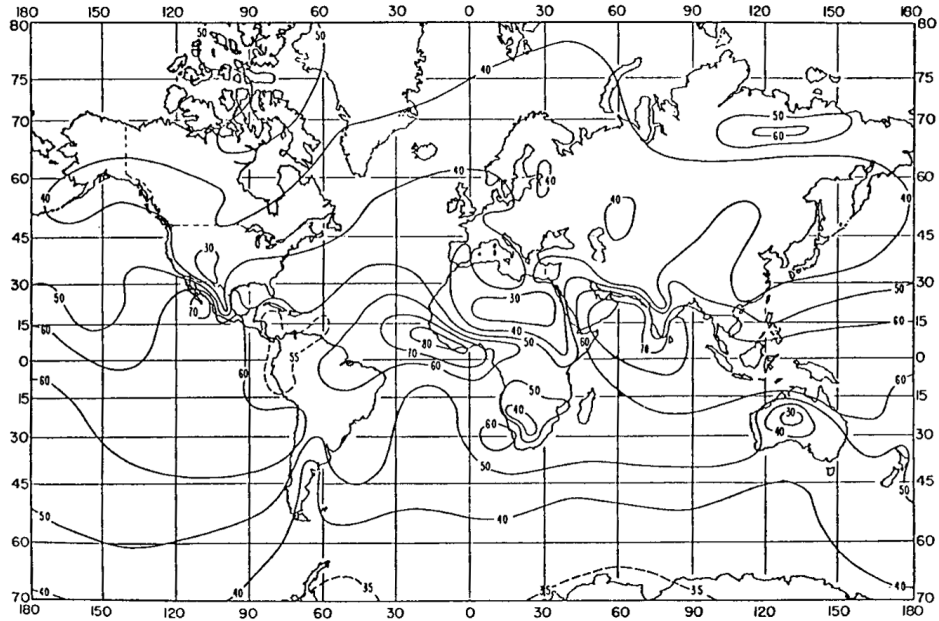
Кроме того, следующие параметры являются неотъемлемой частью настоящей Рекомендации и доступны в форме цифровых карт, а также представлены в Добавлении:

- Годовые значения градиента рефракции в пределах нижних 65 м от поверхности Земли,  $\Delta N_{65m}$ , превышаемые для 0,1, 0,2, 0,5, 1, 2, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 95, 98, 99, 99,5, 99,8, 99,9% времени среднего года.
- Месячные значения градиента рефракции в пределах нижних 65 м от поверхности Земли,  $\Delta N_{65m}$ , превышаемые для 0,1, 0,2, 0,5, 1, 2, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 95, 98, 99, 99,5, 99,8, 99,9% времени среднего месяца.
- Процент времени в году или в месяце, для которого градиент рефракции,  $\Delta N$ , на высоте более 100 м меньше  $-100$  N-единиц/км, (%).

Данные расположены в интервале от  $0^\circ$  до  $360^\circ$  по долготе и от  $+90^\circ$  до  $-90^\circ$  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, как это описано в Рекомендации МСЭ-R P.1144.

РИСУНОК 4

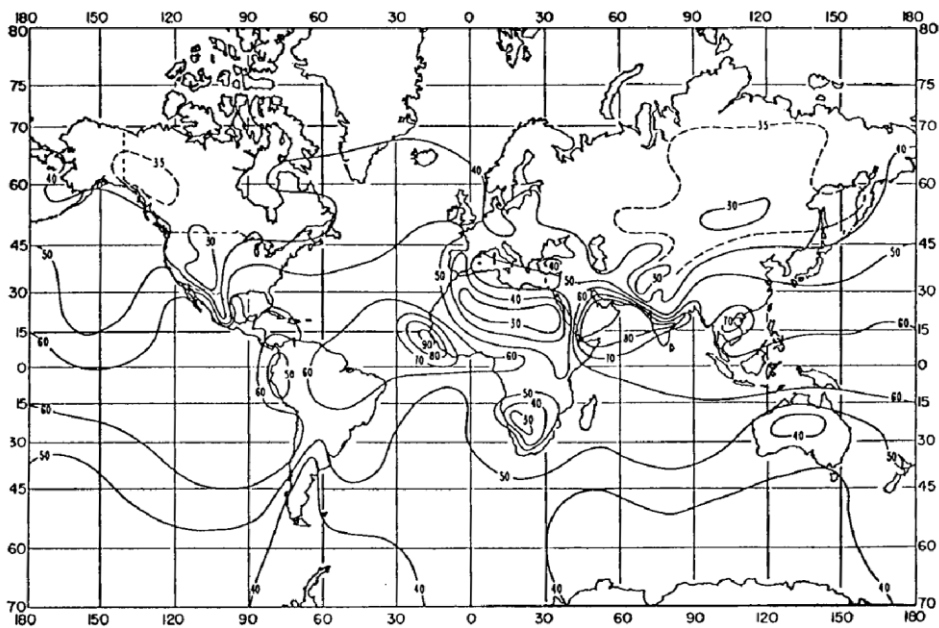
Среднемесячные значения  $\Delta N$ : февраль



P.0453-04

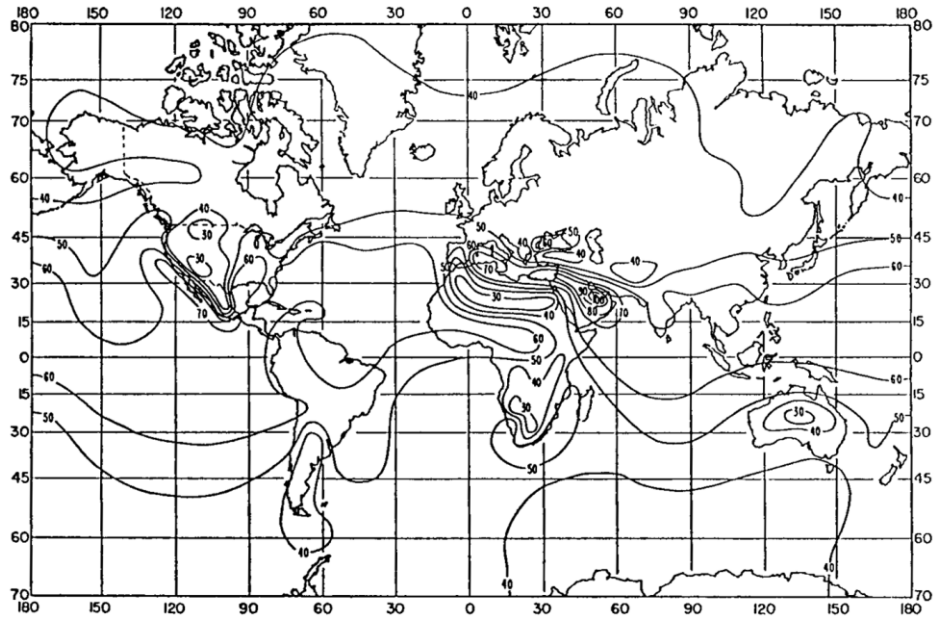
РИСУНОК 5

Среднемесячные значения  $\Delta N$ : май



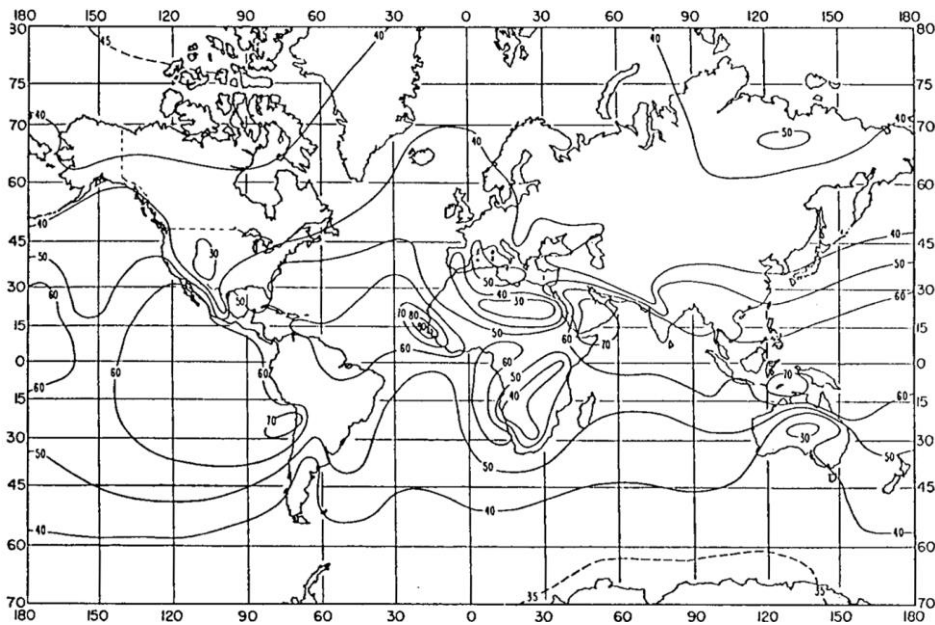
P.0453-05

РИСУНОК 6

Среднемесячные значения  $\Delta N$ : август

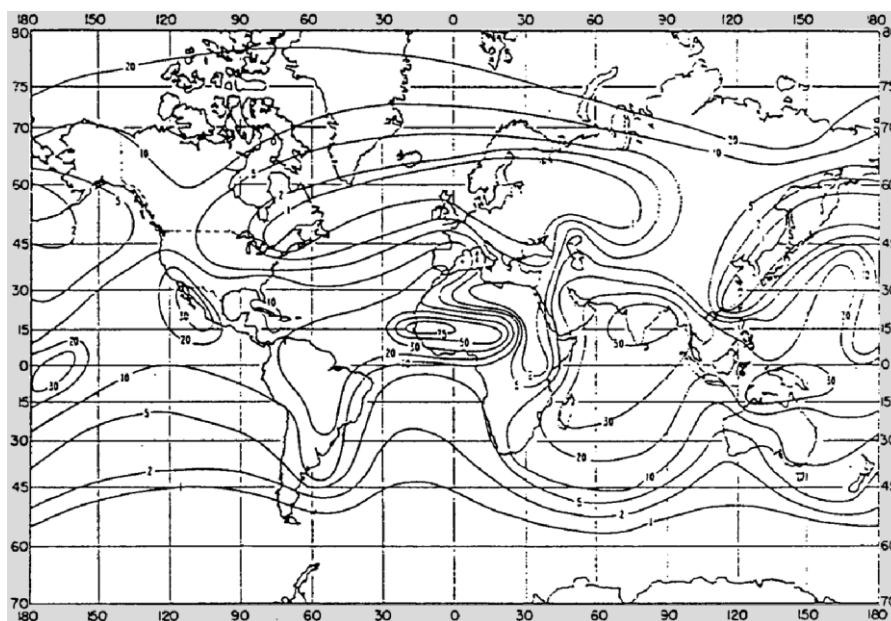
P.0453-06

РИСУНОК 7

Среднемесячные значения  $\Delta N$ : ноябрь

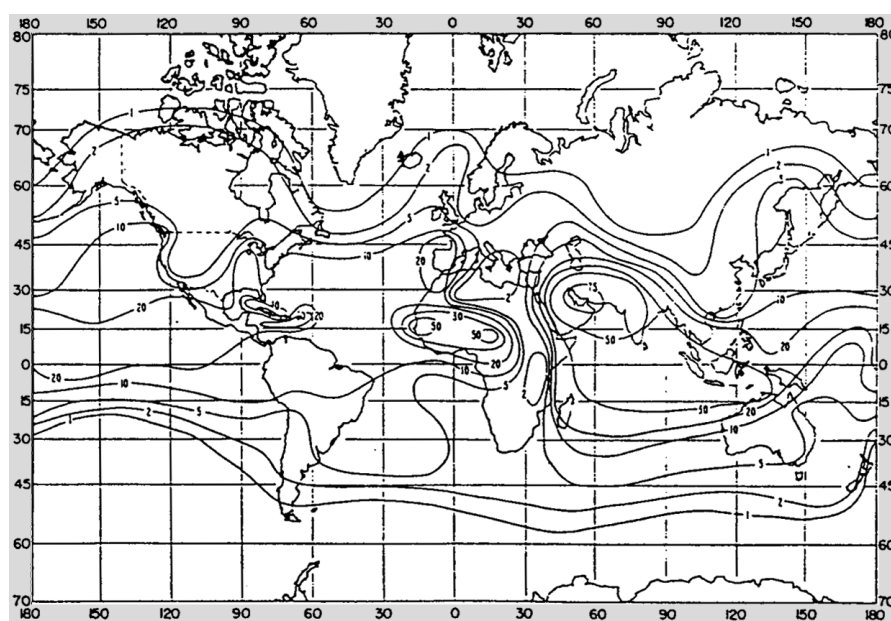
P.0453-07

РИСУНОК 8

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

P.0453-08

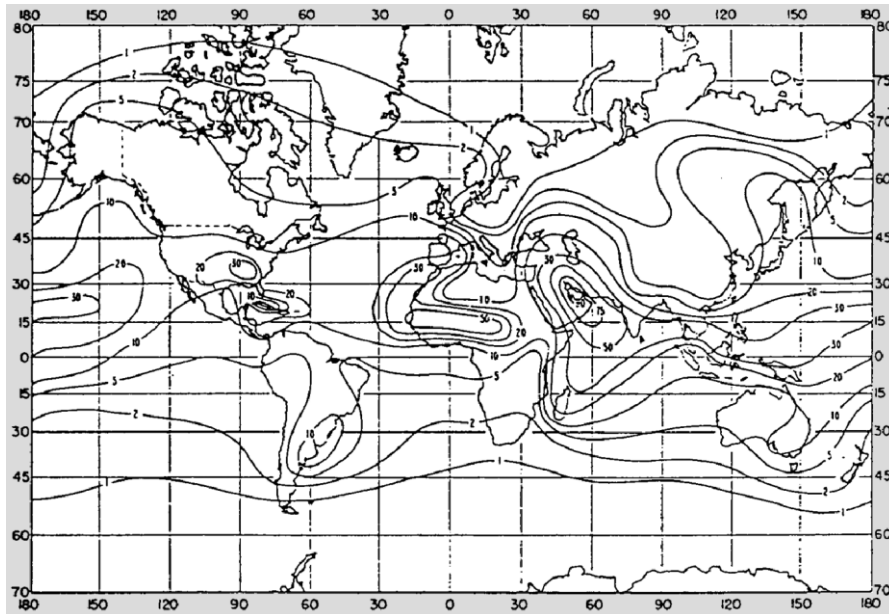
РИСУНОК 9

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

P.0453-09

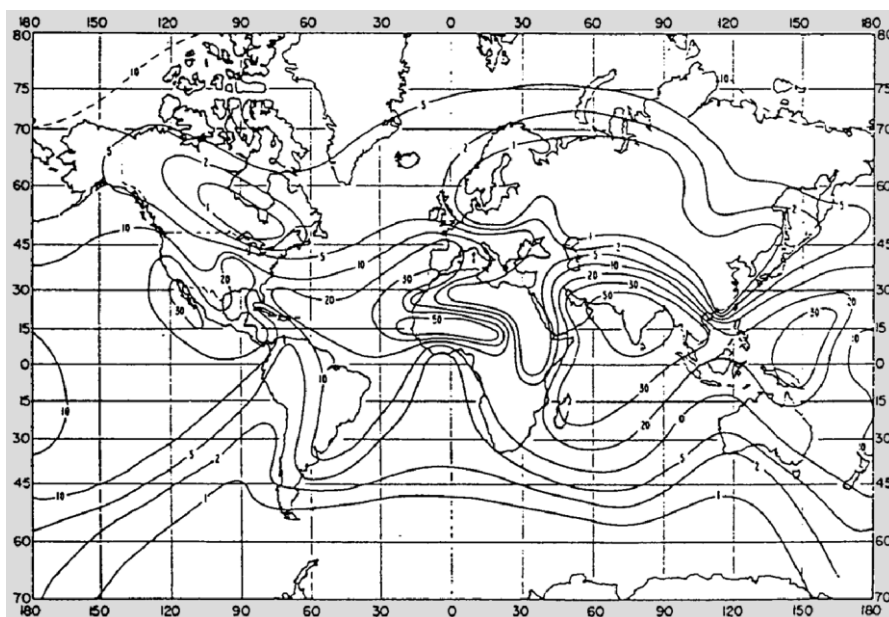


РИСУНОК 10

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

P0453-10

РИСУНОК 11

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

P0453-11

#### 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:

$$Med = \frac{D_n + k_1}{(1/P_0 - 1)^{1/E_0}} - k_1, \quad (14)$$

где:

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

$$k_1 = 30.$$

Уравнение (14) 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 (12).

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

$$P_1 = \frac{1}{1 + \left[ \left( \frac{|D_n - Med|}{B} + k_2 \right) k_3 \right]^{E_1}}, \quad (15)$$

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 (15) 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:

$$P_2 = 1 - \frac{1}{1 + \left[ \left( \frac{|D_n - Med|}{B} + k_2 \right) k_4 \right]^{E_1}}, \quad (16)$$

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 (16) 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:

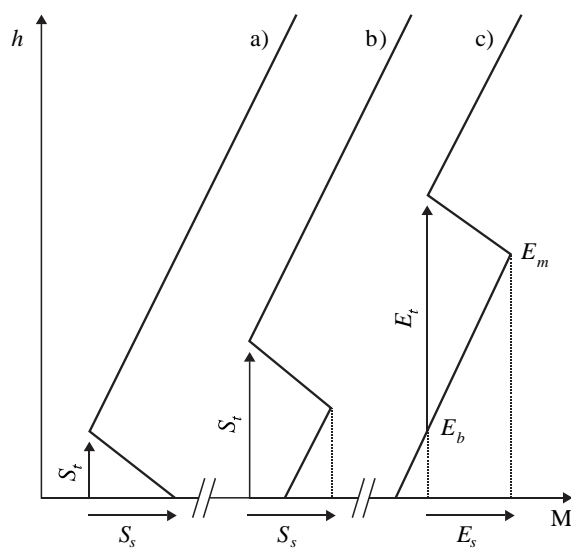
$$M(h) = N(h) + 157h \quad (\text{М-единиц}), \quad (17)$$

где  $h$  (км) – высота.

На рисунке 12 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 12

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



P.0453-12

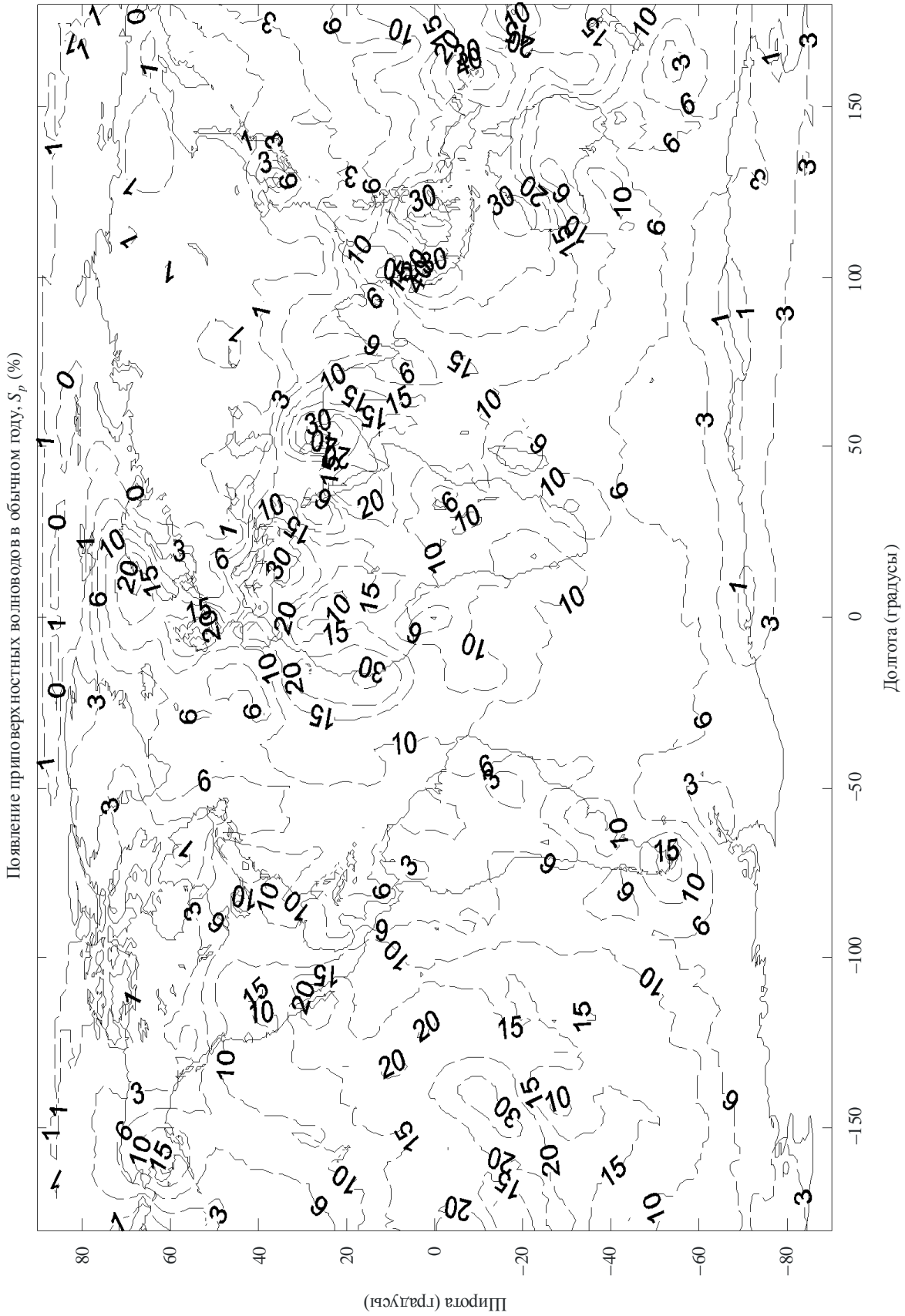
На рисунках 13–20 для удобства ссылки представлены данные, которые содержатся в файлах данных, упомянутых в подписях к этим рисункам. Статистические данные по приповерхностным и промежуточным волноводам были объединены в связи с малочисленностью случаев возникновения промежуточных волноводов.

Данные расположены в интервале от  $0^\circ$  до  $360^\circ$  по долготе и от  $+90^\circ$  до  $-90^\circ$  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 13

Название файла: S\_OCCURRENCE.TXT

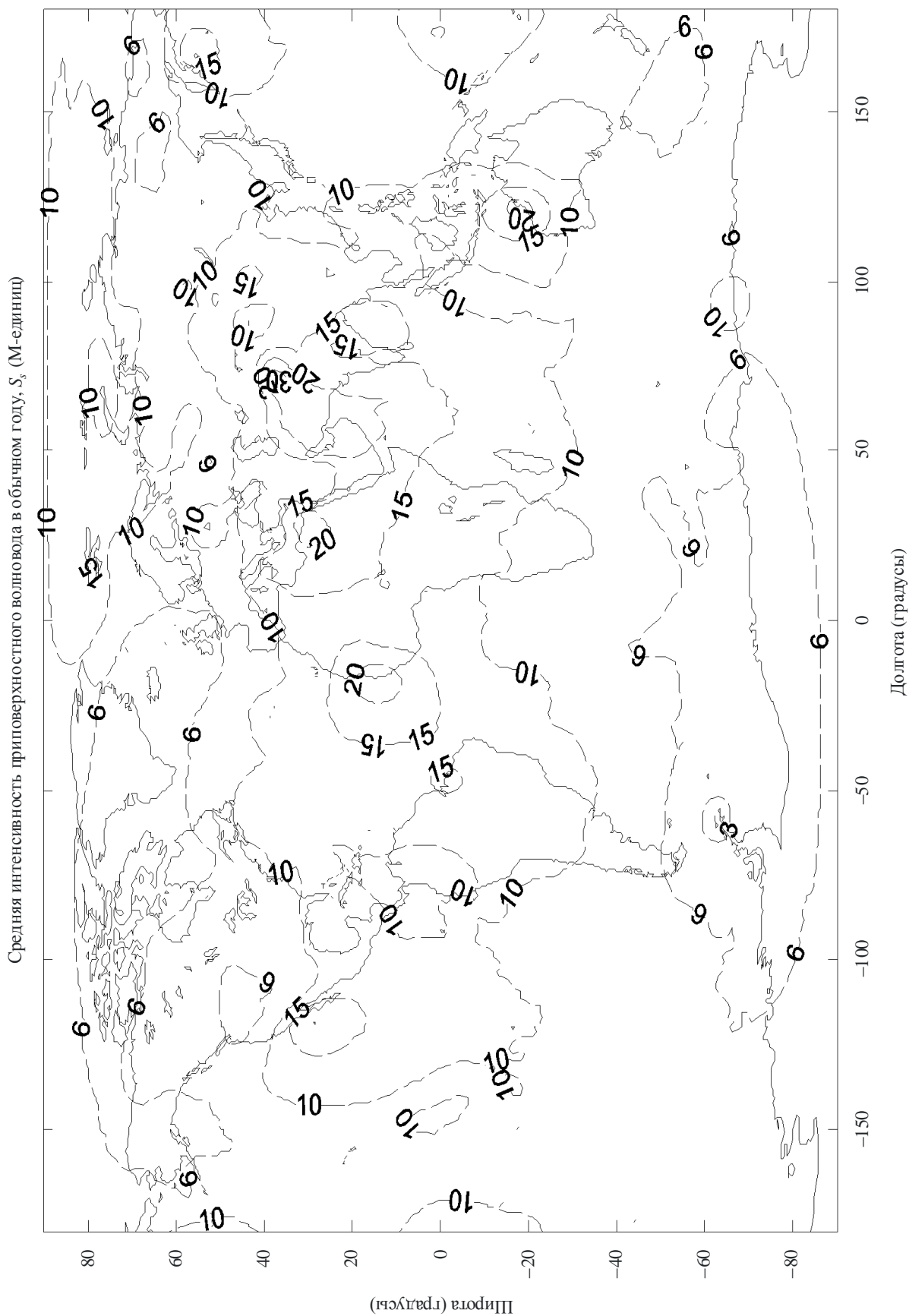


P.0453-13



РИСУНОК 14

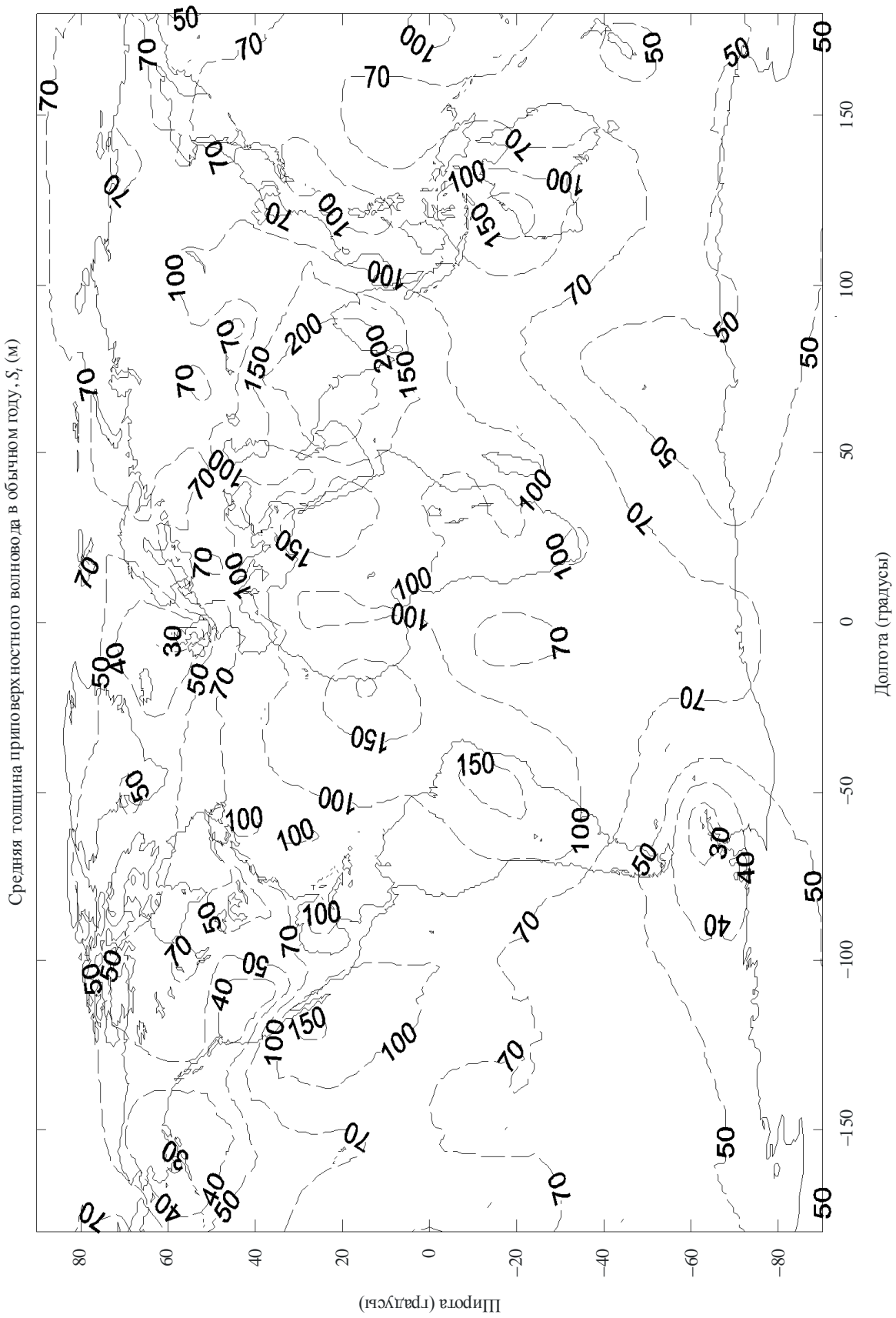
Название файла: S\_STRENGTH.TXT



P.0453-14

РИСУНОК 15

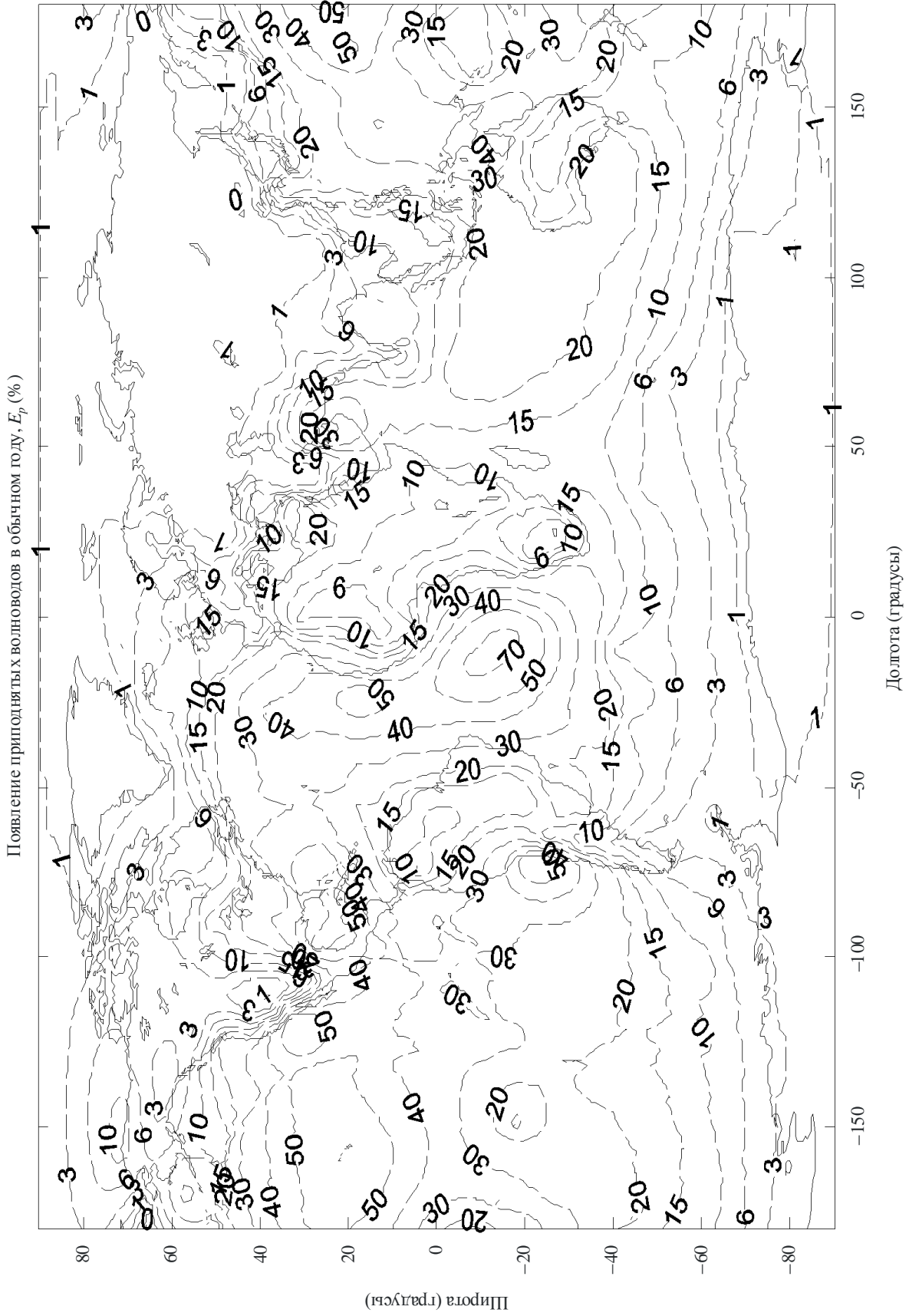
Название файла: S\_THICKNESS.TXT



P.0453-15

РИСУНОК 16

Название файла: E\_OCCURRENCE.TXT



P.0453-16

РИСУНОК 17

Название файла: E\_STRENGTH.TXT

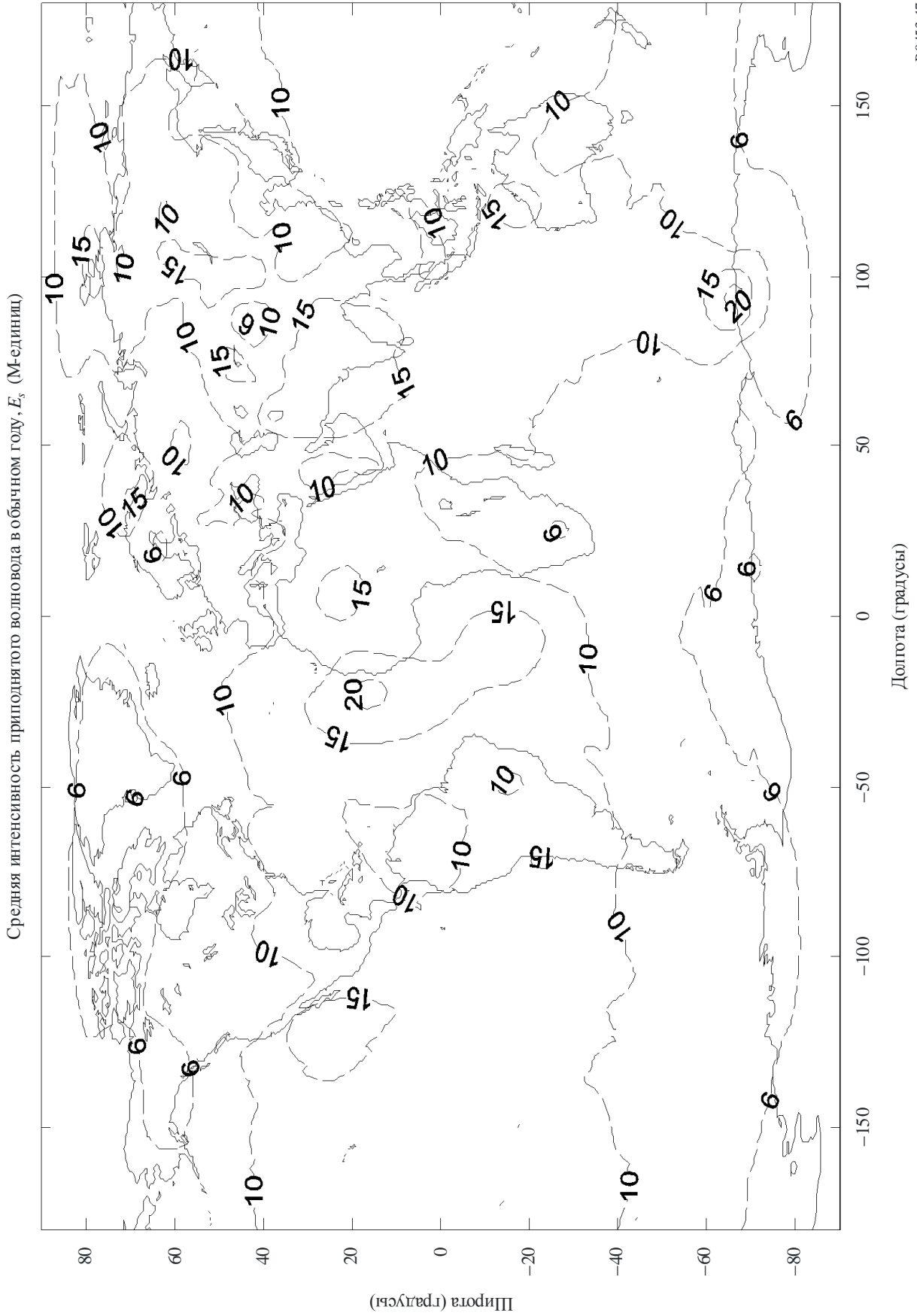
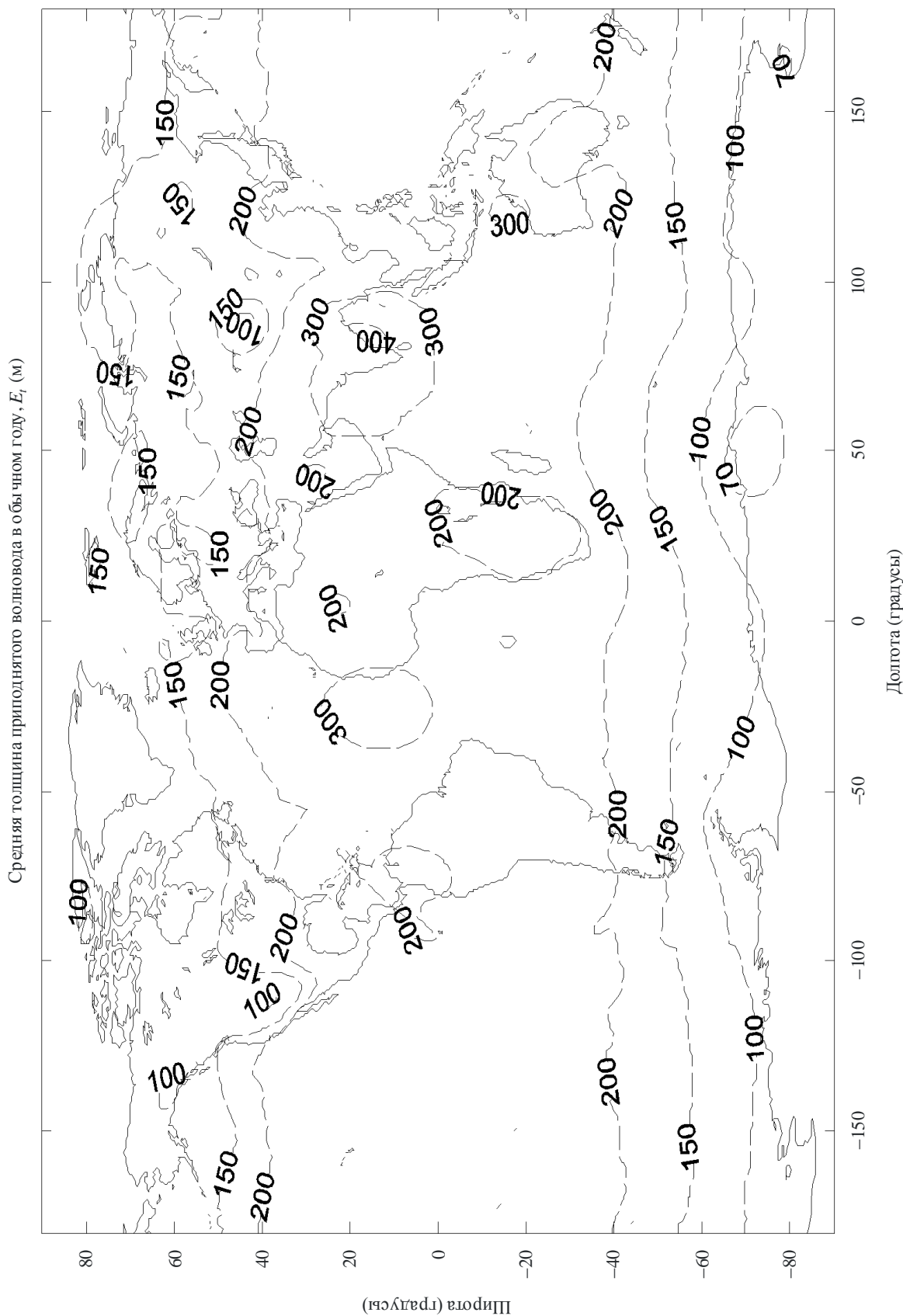


РИСУНОК 18

Название файла: E\_THICKNESS.TXT

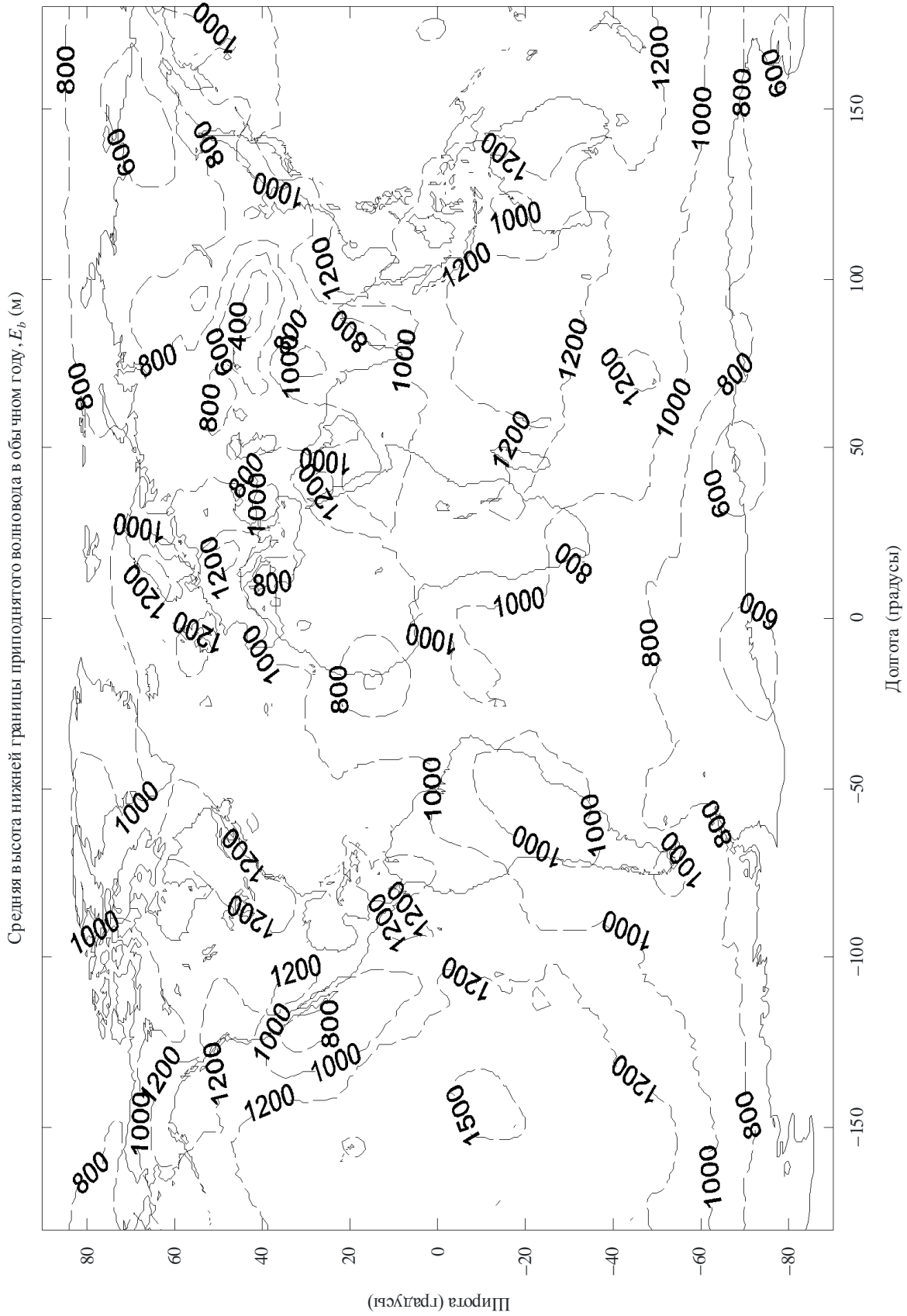


P.04.53-18



РИСУНОК 19

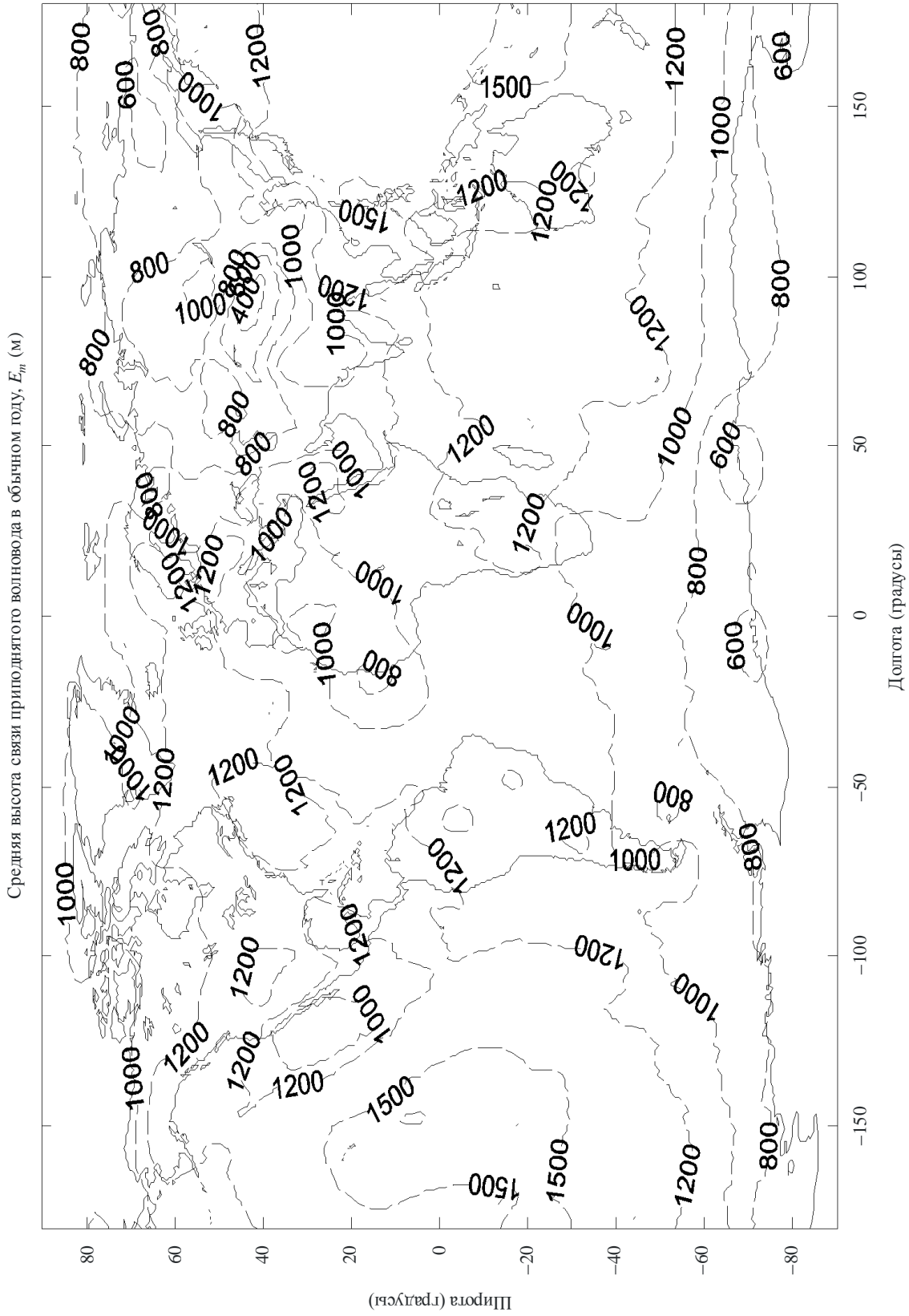
Название файла: E\_BASE.TXT



P:04:53-19

РИСУНОК 20

Название файла: E\_MAX\_M.TXT



P.0453-20