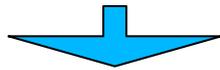


# Анализ спутниковой радиолинии

Анализ спутниковой радиолинии- вычисление и табулирование полезной мощности сигнала и паразитной мощности шума в приемнике, расчет баланса потерь и прибыли.



**Бюджет радиолинии-** результат анализа сведенный в таблицу и определяющий подробное соотношение между ресурсами передачи и приема, источниками шума, поглотителями и результатами процессов, выполняемых в канале, позволяющий определить **достоверность передачи** по каналу связи.

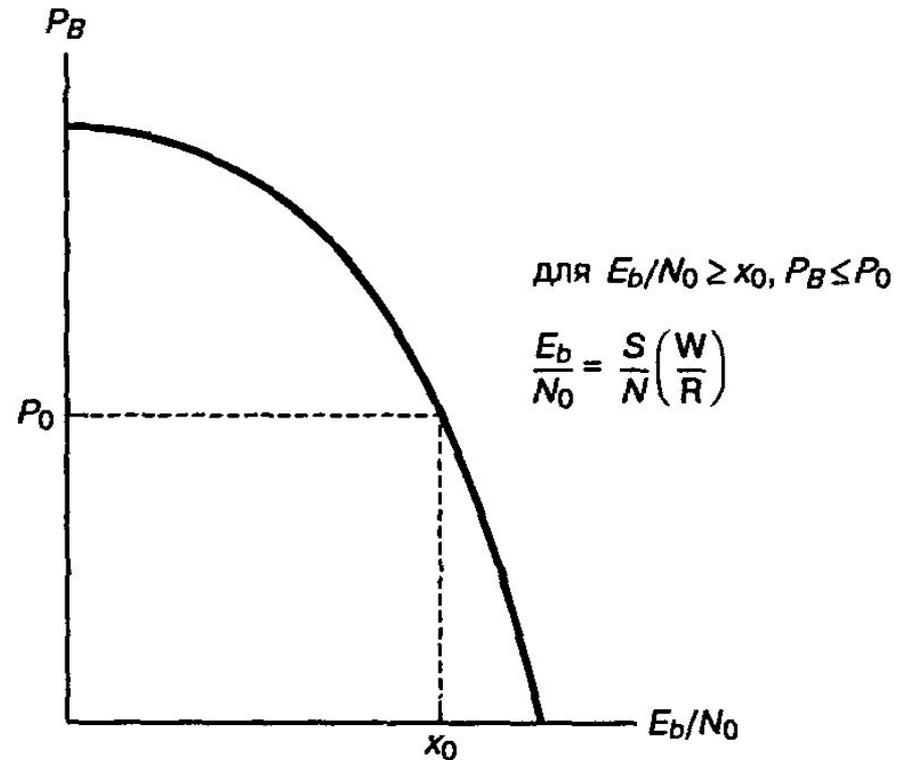
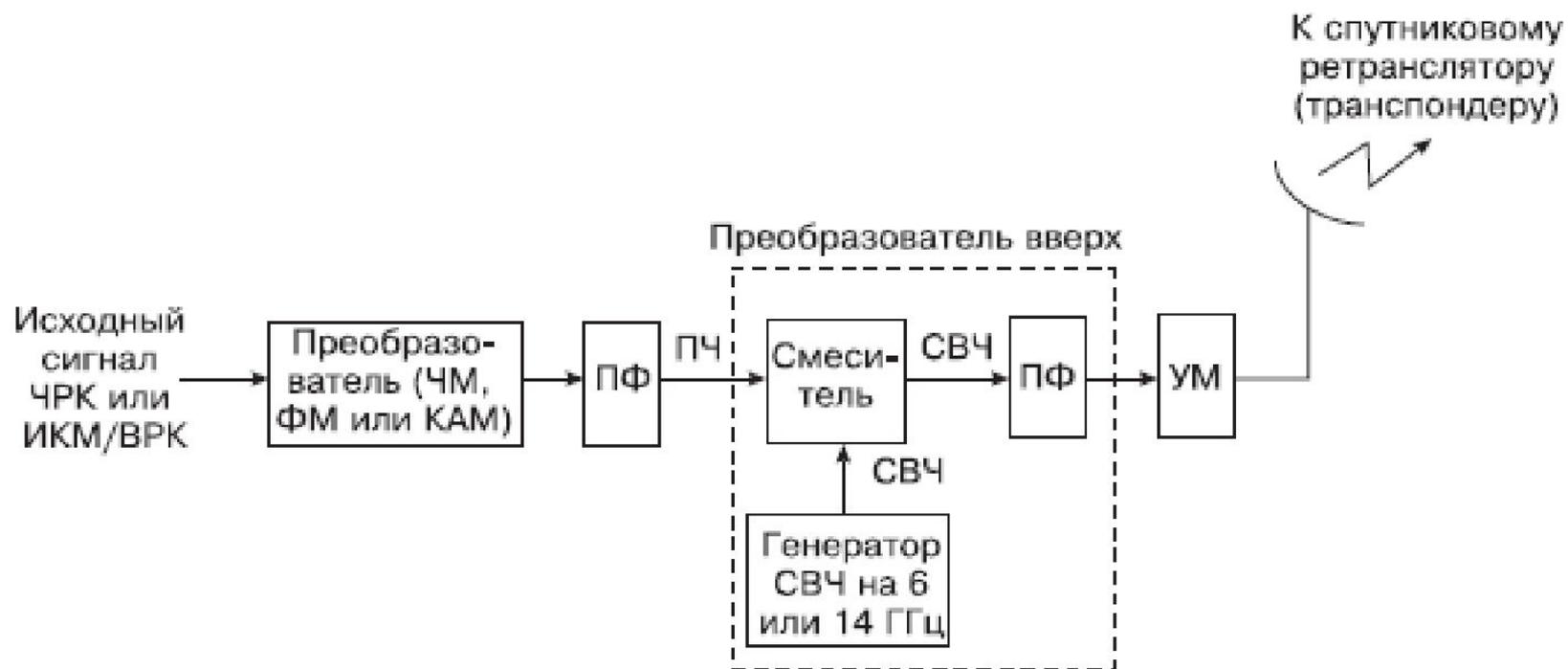
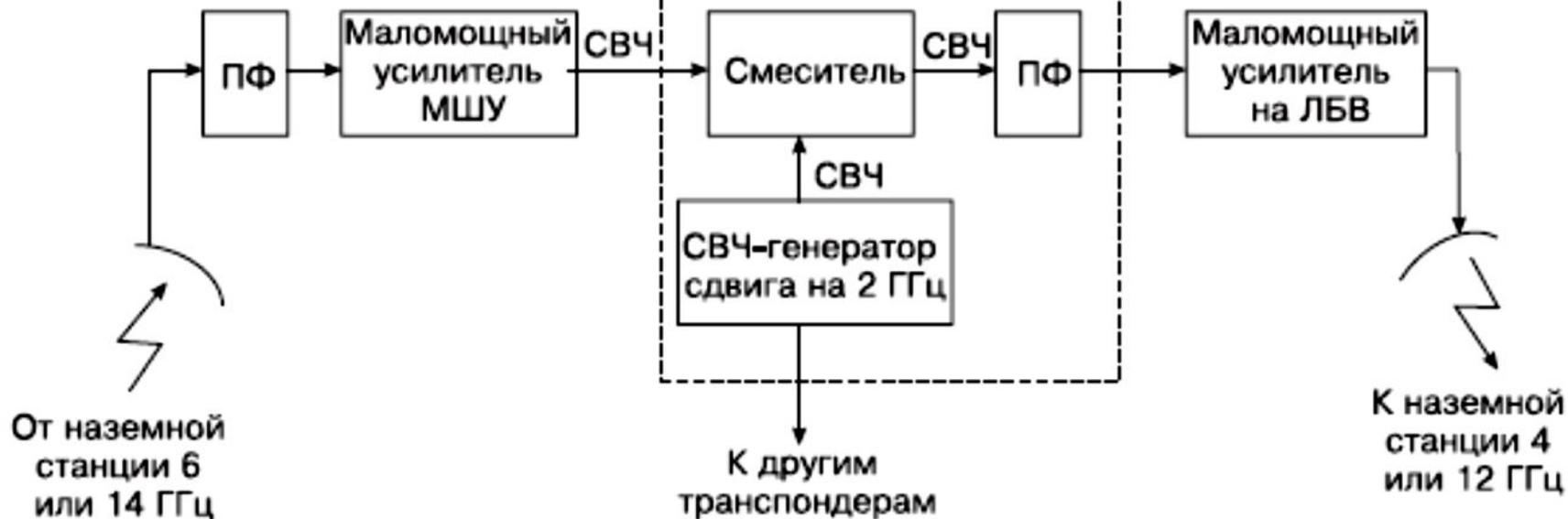


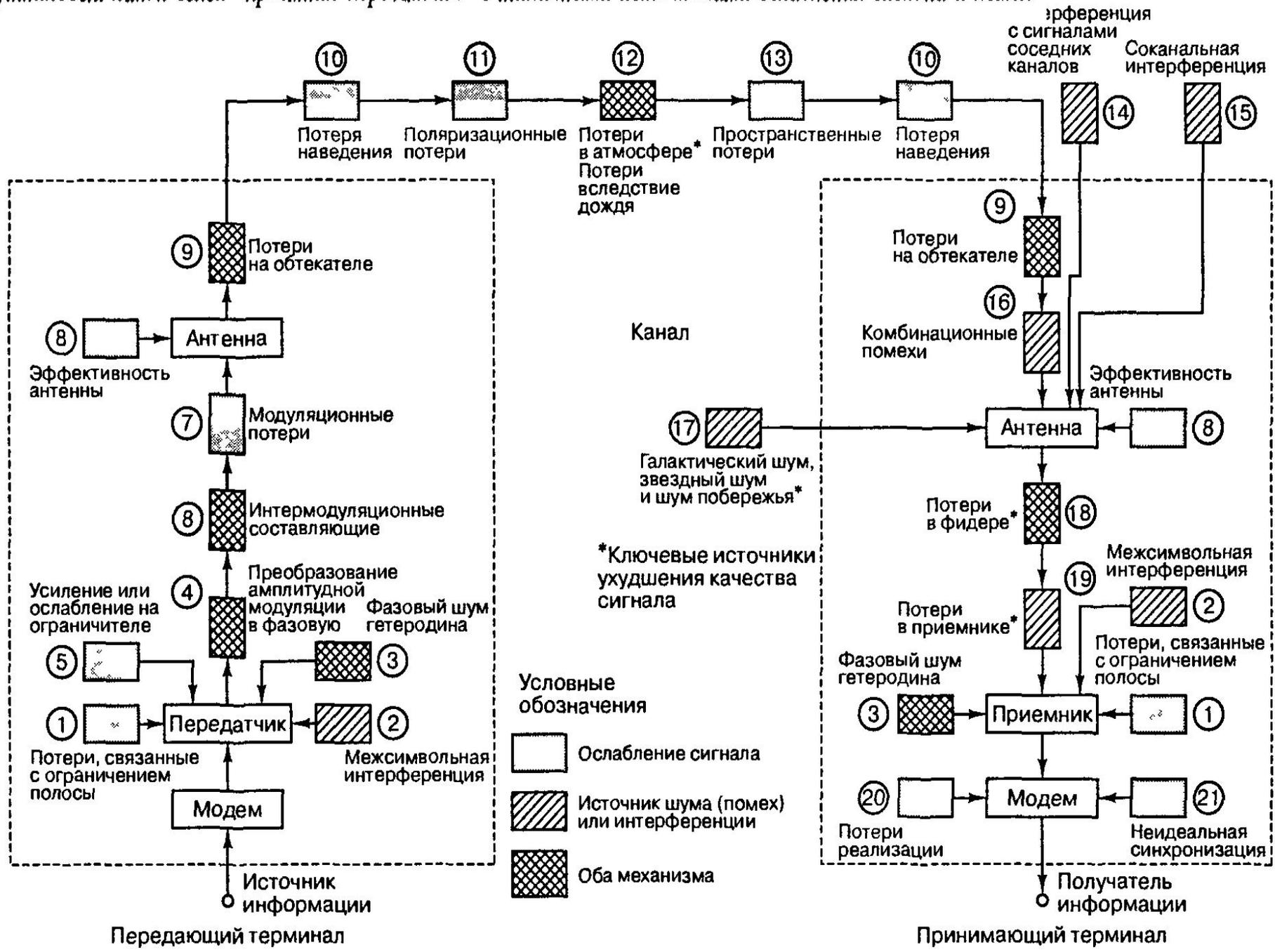
Рис. 3.6. Общий вид зависимости  $P_B$  от  $E_b/N_0$



Блок транспонирования частоты



# Спутниковый канал связи "приемник-передатчик" с типичными источниками ослабления сигнала и помех



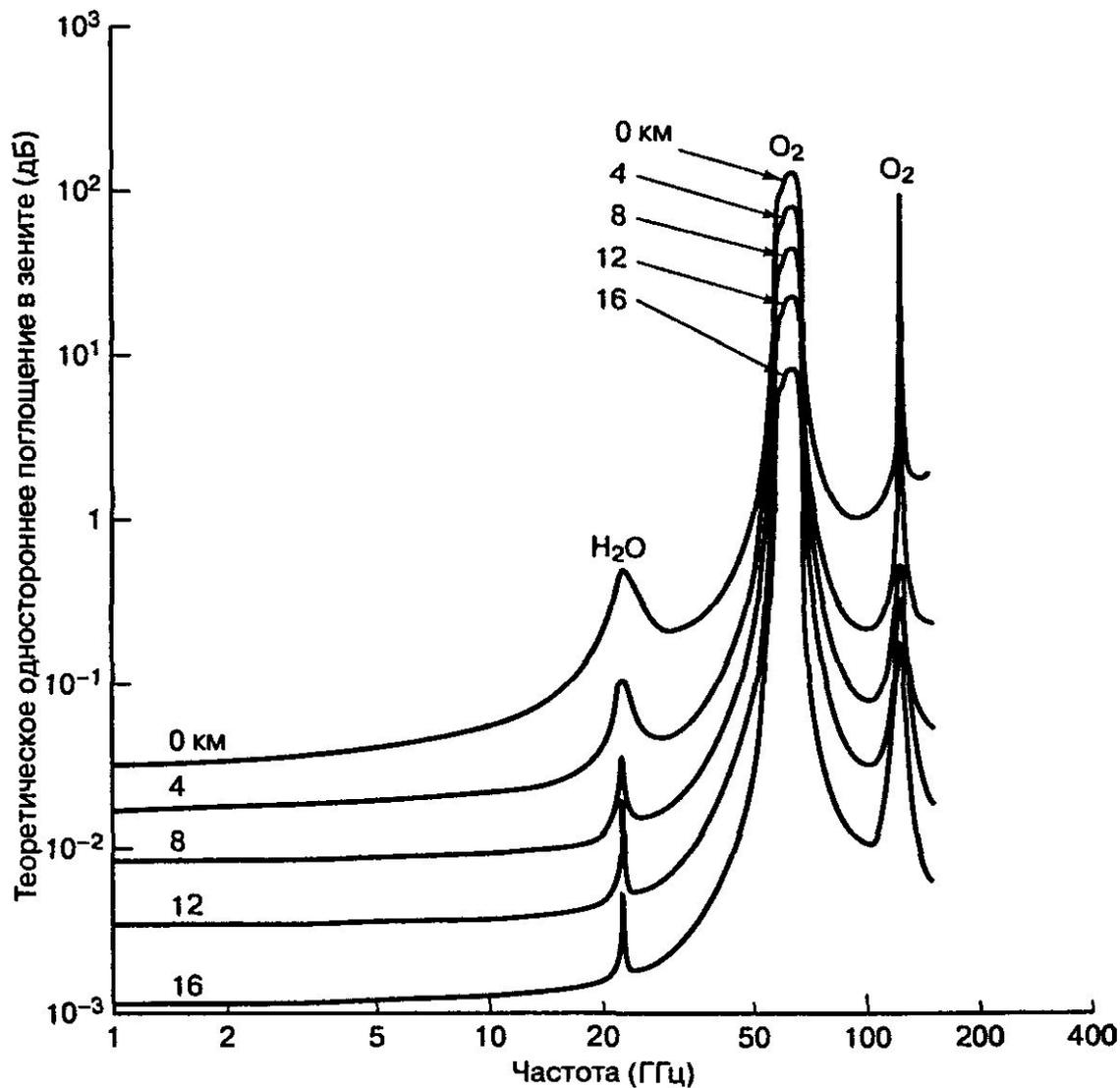


Рис. 5.2. Теоретическое вертикальное одностороннее поглощение от заданной высоты до верхней границы атмосферы для водяного пара плотностью  $7,5 \text{ г/м}^3$  на поверхности. (Поглощение дождем или облаками не учитывается.) (Перепечатано с разрешения Национального комитета по авиации и исследованию космического пространства из NASA Reference Publication 1082(03), "Propagation Effects Handbook for Satellite Systems Design", June, 1983, Fig. 6.2-1, p. 218.)



$$\eta = \frac{P_{rad}}{P_{in}} \cdot 100, \quad \rightarrow \quad \eta = \frac{P_{rad}}{P_{rad} + P_d} \cdot 100$$

$$P_{in} = P_{rad} + P_d$$

**КНД**  $\rightarrow$   $D = \frac{\mathcal{P}}{\mathcal{P}_{ref}}$

где  $D$  — коэффициент направленного действия (безразмерный);  $\mathcal{P}$  — плотность мощности в некоторой точке для заданной антенны, Вт/м<sup>2</sup>;  $\mathcal{P}_{ref}$  — плотность мощности в той же точке для опорной антенны, Вт/м<sup>2</sup>.

**КУ по мощности**  $\rightarrow$   $A_p = D \cdot \eta \rightarrow A_{P(дБ)} = 10 \log(D \cdot \eta)$

$$\mathbf{EIRD} \rightarrow \text{ЭИИМ} = P_{rad} D_t, \text{ Вт},$$

где  $P_{rad}$  — суммарная излучаемая мощность, Вт;  $D_t$  — коэффициент направленного действия передающей антенны (безразмерная величина) или

$$\text{ЭИИМ}_{(\text{дБ/мВт})} = 10 \log \frac{P_{rad}}{0,001} + 10 \log D_t$$

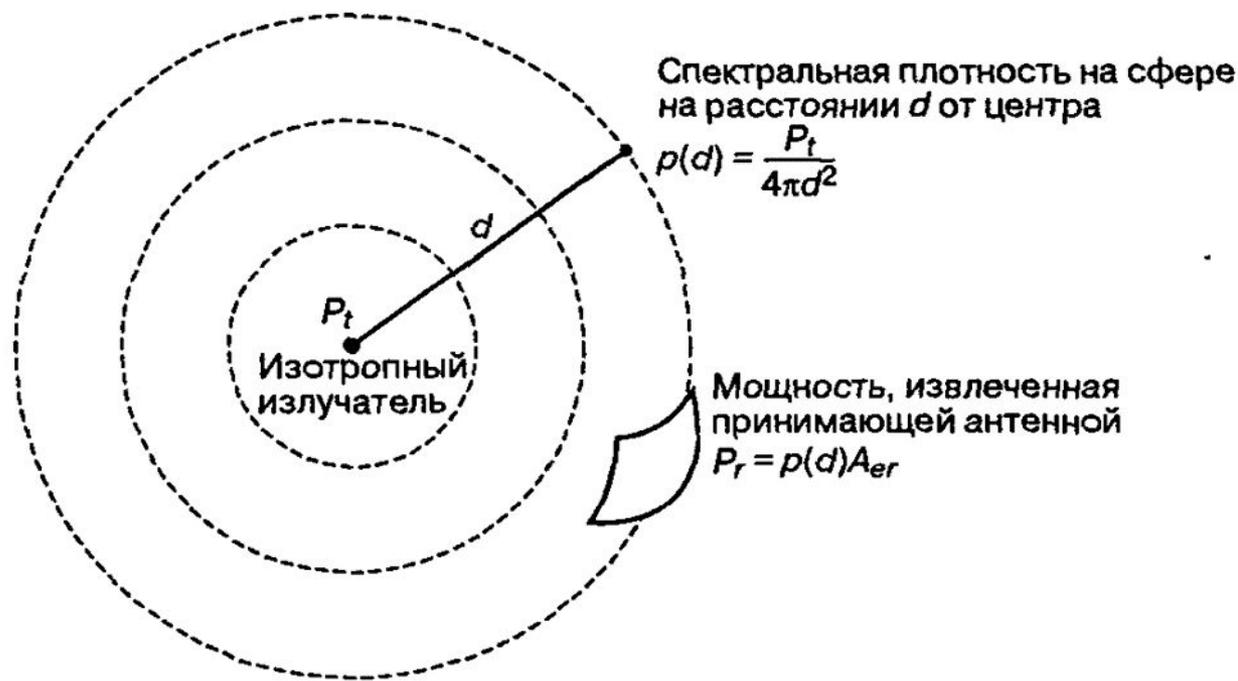
$$\text{ЭИИМ}_{(\text{дБ/Вт})} = 10 \log (P_{rad} D_t)$$

$$\text{ЭИИМ} = P_{in} A_t, \text{ Вт}$$

где  $P_{in}$  — суммарная мощность на входе антенны, Вт;  $A_t$  — коэффициент усиления по мощности передающей антенны (безразмерный) или

$$\text{ЭИИМ}_{(\text{дБ/мВт})} = 10 \log \left( \frac{P_{in} A_t}{0,001} \right)$$

$$\text{ЭИИМ}_{(\text{дБ/Вт})} = 10 \log (P_{in} A_t).$$



$$\mathcal{P} = \frac{P_{in} A_t}{4\pi R^2}$$

$$\mathcal{P} = \frac{P_{rad} D_t}{4\pi R^2}$$

где  $\mathcal{P}$  — плотность мощности, Вт/м<sup>2</sup>;  $P_{in}$  — входная мощность передающей антенны, Вт;  $P_{rad}$  — мощность, излучаемая передающей антенной, Вт;  $A_t$  — коэффициент усиления по мощности передающей антенны (безразмерный);  $D_t$  — коэффициент направленного действия передающей антенны (безразмерный);  $R$  — расстояние от передающей антенны, м.

**Пример** Для передающей антенны с коэффициентом усиления по мощности  $A_t = 10$  и входной мощностью  $P_{ex} = 100$  Вт определить: а) ЭИИМ в Вт, дБ/мВт и дБ/Вт; б) плотность мощности в точке на расстоянии 10 м от передающей антенны; в) плотность мощности изотропной антенны, имеющей такие же входную мощность и КПД.

Коэффициент направленного действия передающей антенны ( $D_i$ )

Коэффициент усиления по мощности передающей антенны ( $A_i$ )



$$R_{[обл]} = \sqrt{(H_{ка} + R_3)^2 + R_3^2 - 2(H_{ка} + R_3)R_3 \cos \psi}, \quad (3)$$

где  $R_3 = 6370$  км — радиус Земли,  $\psi$  — угол, проведенный из центра Земли, между направлениями на ЗС и КА.

## Плотность мощности захвата

$$C = \frac{P_{in} \cdot A_t \cdot A_r}{4\pi R^2}$$

где  $C$  — плотность мощности захвата, Вт/м<sup>2</sup>;  $P_{in}$  — мощность на входе передающей антенны, Вт;  $A_t$  — коэффициент усиления по мощности передающей антенны (безразмерная величина);  $A_r$  — коэффициент усиления по мощности приемной антенны (безразмерная величина);  $R$  — расстояние между передающей и приемной антеннами (в метрах).

$$A_c = \frac{A_r \lambda^2}{4\pi} \quad \rightarrow \quad A_r = \frac{A_c 4\pi}{\lambda^2}$$

где  $A_c$  — эффективная площадь захвата, м<sup>2</sup>;  $\lambda$  — длина волны принимаемого сигнала, м;  $A_r$  — коэффициент усиления по мощности приемной антенны (безразмерная величина).

$$P_{cap} = P A_c$$

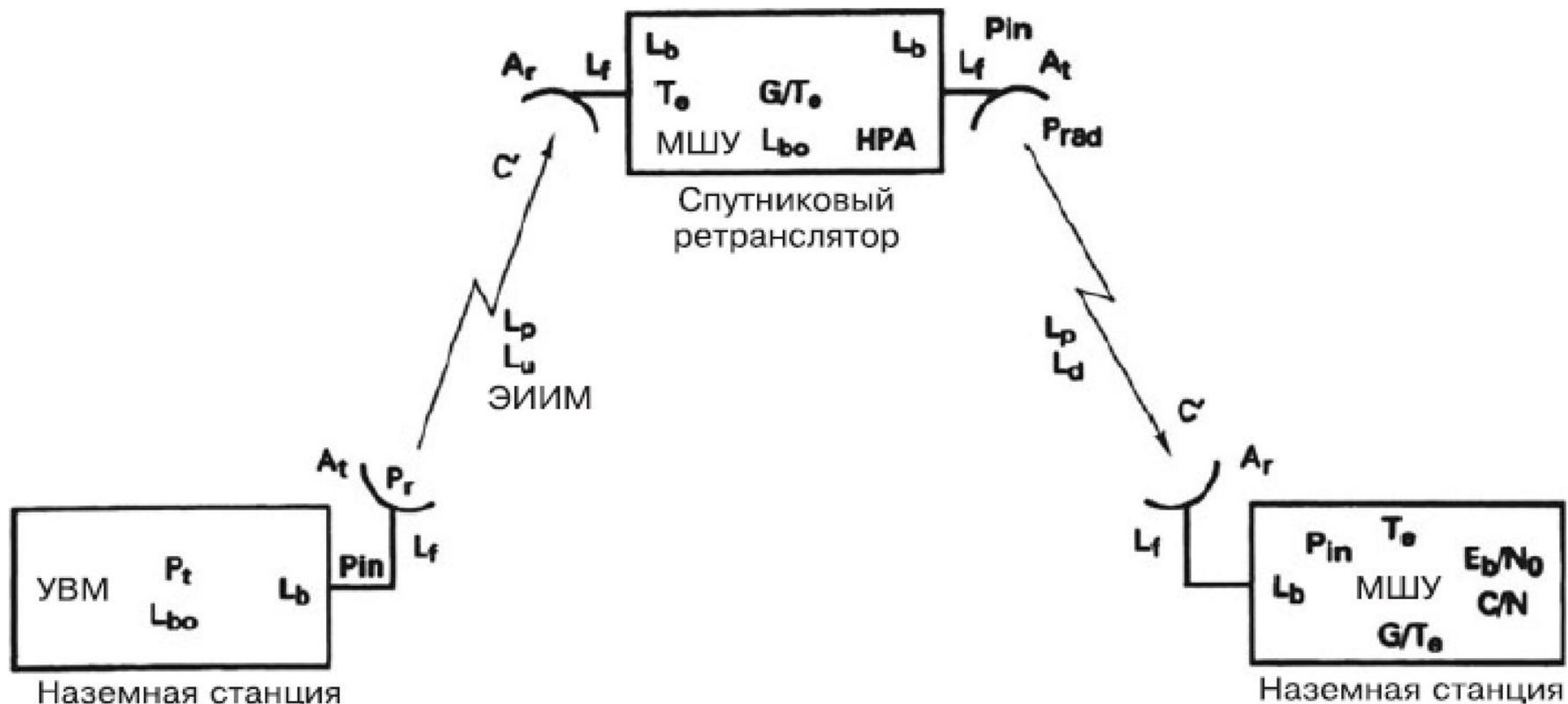
где  $P_{cap}$  — захваченная мощность, Вт;  $P = \frac{P_{in} A_t}{4\pi R^2}$  — плотность мощности, Вт/м<sup>2</sup>;  $A_c$  — площадь захвата, м<sup>2</sup>;  $P_{in}$  — мощность на входе передающей антенны, Вт;  $A_t$  — коэффициент усиления по мощности передающей антенны (безразмерная величина);  $R$  — расстояние между передающей и приемной антеннами (в метрах).

$$P_{cap} = P \left( \frac{A_r \lambda^2}{4\pi} \right) = \left( \frac{P_{in} A_t}{4\pi R^2} \right) \left( \frac{A_r \lambda^2}{4\pi} \right) = \frac{P_{in} A_t A_r \lambda^2}{4\pi R^2 (4\pi)} =$$

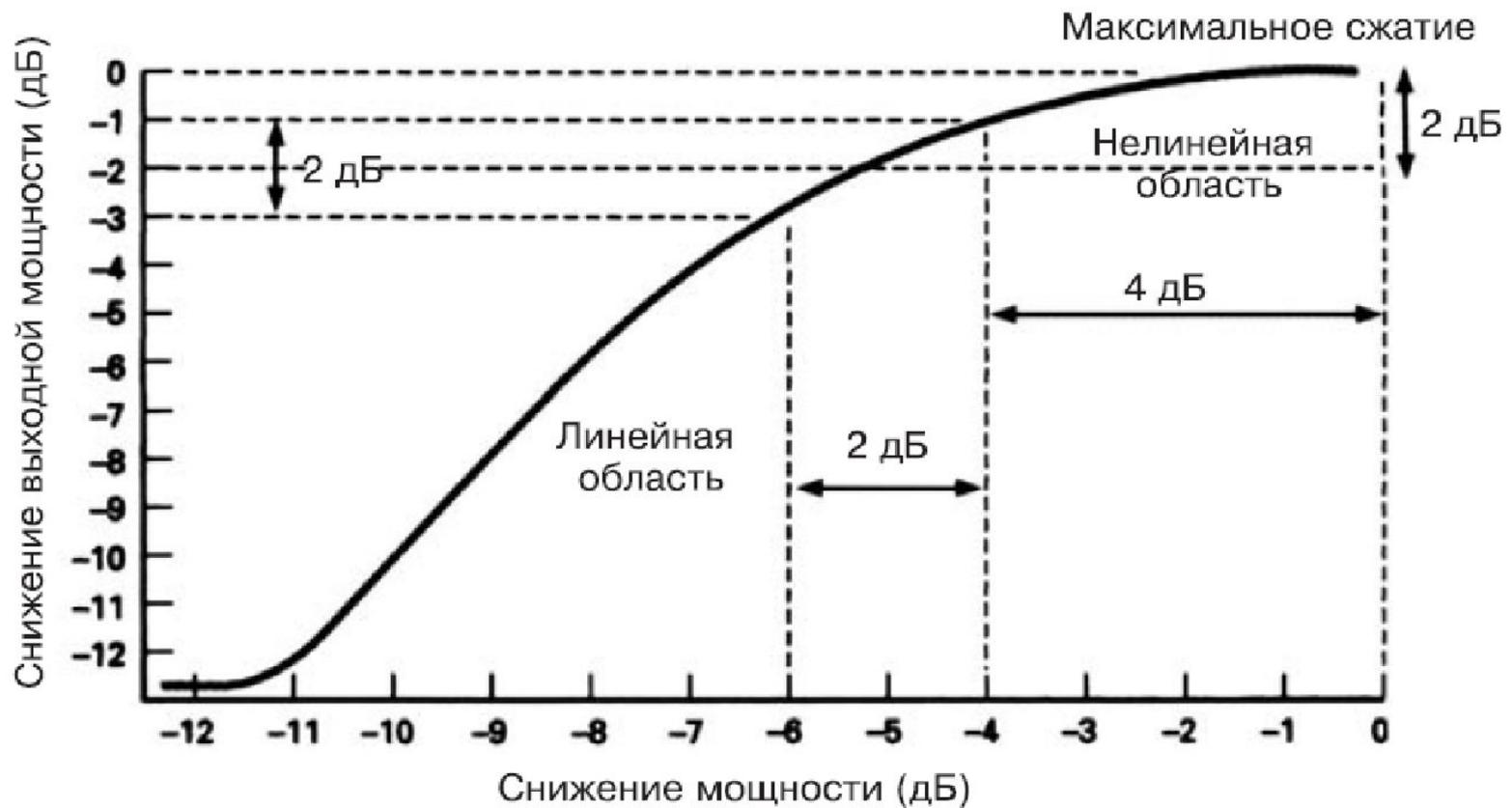
$$P_{cap} = (P_{in} A_t A_r) \left( \frac{\lambda^2}{16\pi^2 R^2} \right)$$

$$P_{cap}(\text{дБм}) = 10 \log \left( \frac{P_{in} A_t A_r}{0,001} \right) - 10 \log \left( \frac{\lambda^2}{16\pi^2 R^2} \right) =$$

= захваченная мощность (дБм) – потери в тракте ( $L_p$ ) (дБ)



Упрощенная структурная схема цифровой спутниковой системы, на которой отмечены усиления и потери, действующие в системе на обоих участках: «Земля – спутник» и «спутник – Земля». УВМ — усилитель высокой мощности;  $P_t$  — выходная мощность УВМ;  $L_{bo}$  — потери снижения мощности;  $L_f$  — потери линии передачи;  $L_b$  — потери в разветвителях;  $A_t$  — усиление передающей антенны;  $P_r = P_t - L_{bo} - L_b - L_f$  — общая излучаемая мощность; ЭИИМ — эффективная изотропно излучаемая мощность,  $P_{rad}A_t$ ;  $L_u$  — дополнительные потери, вносимые атмосферой на участке «Земля – спутник»;  $G/T_e$  — отношение усиления к эквивалентной шумовой температуре;  $L_p$  — потери в тракте;  $A_r$  — усиление приемной антенны;  $L_d$  — дополнительные потери, вносимые атмосферой на участке «спутник – Земля»; МШУ — малошумящий усилитель;  $C/T_e$  — отношение мощности несущей к эквивалентной шумовой температуре;  $C/N_0$  — отношение мощности несущей к плотности мощности шума;  $E_b/N_0$  — отношение энергии одного бита к плотности мощности шума;  $C/N$  — отношение мощности несущей к мощности шума



$$P_{in} = P_t - L_{bo} - L_{bf} \quad \text{ЭИИМ} = P_t - L_{bo} - L_{bf} + A_t$$

где  $P_{in}$  — мощность на входе антенны, (дБ относительно 1 Вт);  $L_{bo}$  — потери из-за снижения мощности, дБ;  $L_{bf}$  — суммарные потери подсоединения и в соединительном кабеле, дБ;  $A_t$  — усиление передающей антенны, дБ;  $P_t$  — выходная мощность насыщения усилителя, (дБ относительно 1 Вт).

## Уравнение линии «Земля – спутник»

$$\frac{C}{N_0} = \frac{A_t P_{in} (L_p L_u) A_r}{K T_e} = \frac{A_t P_{in} (L_p L_u)}{K} \cdot \frac{G}{T_e},$$

$$\frac{C}{N_0} = \underbrace{10 \log A_t P_{in}}_{\text{ЭИИМ наземной станции}} - L_p - \underbrace{20 \log \frac{4\pi D}{\lambda}}_{\text{потери в свободном пространстве}} + \underbrace{10 \log \frac{G}{T_e}}_{\text{Отношение } G/T_e \text{ спутника}} - \underbrace{10 \log L_u}_{\text{Дополнительные атмосферные потери}} - \underbrace{10 \log K}_{\text{Постоянная Больцмана}}$$

$$\frac{C}{N_0} = \text{ЭИИМ(дБВт)} - L_p(\text{дБ}) + \frac{G}{T_e}(\text{дБ/К}) - L_u(\text{дБ}) - K(\text{дБВтК})$$

$$\text{ЭИИМ} = P_t - L_{bo} - L_{bf} + A_t$$

$$\frac{G}{T_e} = G - 10 \log T_s \quad \text{дБ/°К}$$

где  $G$  — усиление приемной антенны, дБ;  $T_s$  — рабочая или системная температура, °К. Системная температура определяется как  $T_s = T_a + T_r$ , где  $T_a$  — температура антенны, °К;  $T_r$  — эффективная шумовая температура на входе приемника.

## Уравнение линии «спутник – Земля»

$$\frac{C}{N_0} = \frac{A_t P_{in} (L_p L_d) A_r}{K T_e} = \frac{A_t P_{in} (L_p L_d)}{K} \cdot \frac{G}{T_e}$$

$$\frac{C}{N_0} = \underbrace{10 \log A_t P_{in}}_{\substack{\text{ЭИИМ} \\ \text{спутника}}} - \underbrace{20 \log \frac{4\pi D}{\lambda}}_{\substack{L_p \text{ — потери} \\ \text{в свободном пространстве}}} + \underbrace{10 \log \frac{G}{T_e}}_{\substack{\text{Отношение } G/T_e \\ \text{наземной станции}}} \cdot \underbrace{10 \log L_d}_{\substack{\text{Дополнительные} \\ \text{атмосферные потери}}} - \underbrace{10 \log K}_{\substack{\text{Постоянная} \\ \text{Больцмана}}}$$

$$\frac{C}{N_0} = \text{ЭИИМ(дБВт)} - L_p(\text{дБ}) + \frac{G}{T_e}(\text{дБ/К}) - L_d(\text{дБ}) - K(\text{дБВтК}).$$

Энергетический баланс используется обычно для определения проектируемых отношений  $C/N$  и  $E_b/N_0$  для обоих направлений участков «Земля – спутник» и «спутник – Земля» при заданном виде модуляции и допустимой величине ошибки  $P(e)$ .

$$\frac{E_b}{N_0}(\text{итоговое}) = \frac{(E_b/N_0)_u \cdot (E_b/N_0)_d}{(E_b/N_0)_u + (E_b/N_0)_d},$$

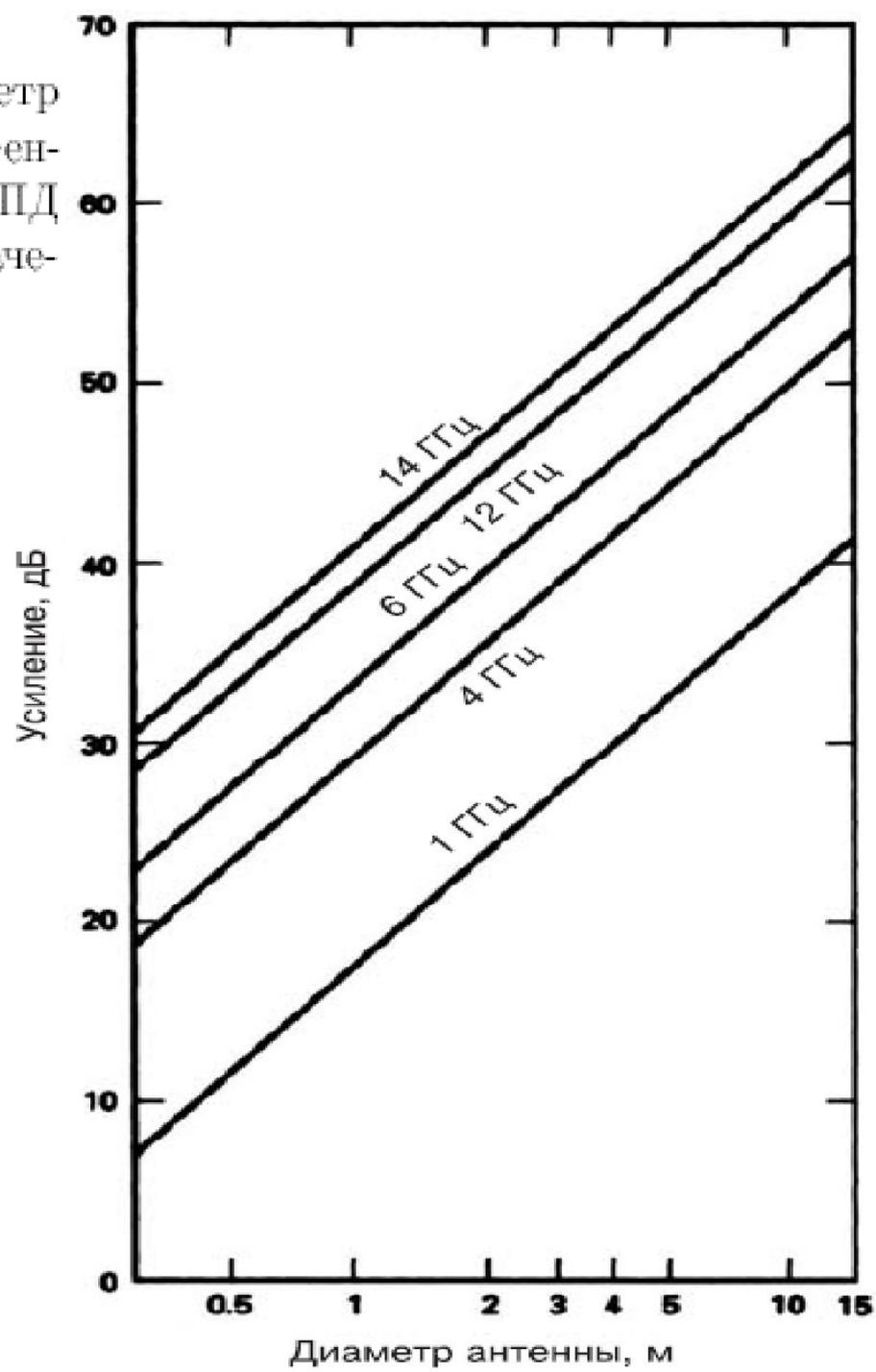
### Направление «Земля – спутник»

Выходная мощность передатчика наземной станции, порог насыщения	33 дБВт (2000 Вт)
Потери снижения мощности	3 дБ
Потери ответвления и в фидере наземной станции	4 дБ
Усиление антенны наземной станции (по рис. 25.27, 15 м на 14 ГГц)	64 дБ
Дополнительное затухание в атмосфере	0,6 дБ
Потери в свободном пространстве (по рис. 25.28 на 14 ГГц)	206,5 дБ
Отношение $G/T_e$ приемника спутника	-5,3 дБ/°К
Потери ответвления и в фидере спутника	0 дБ
Скорость передачи	120 Мбит/сек
Вид модуляции	ФМ8

### Направление «спутник – Земля»

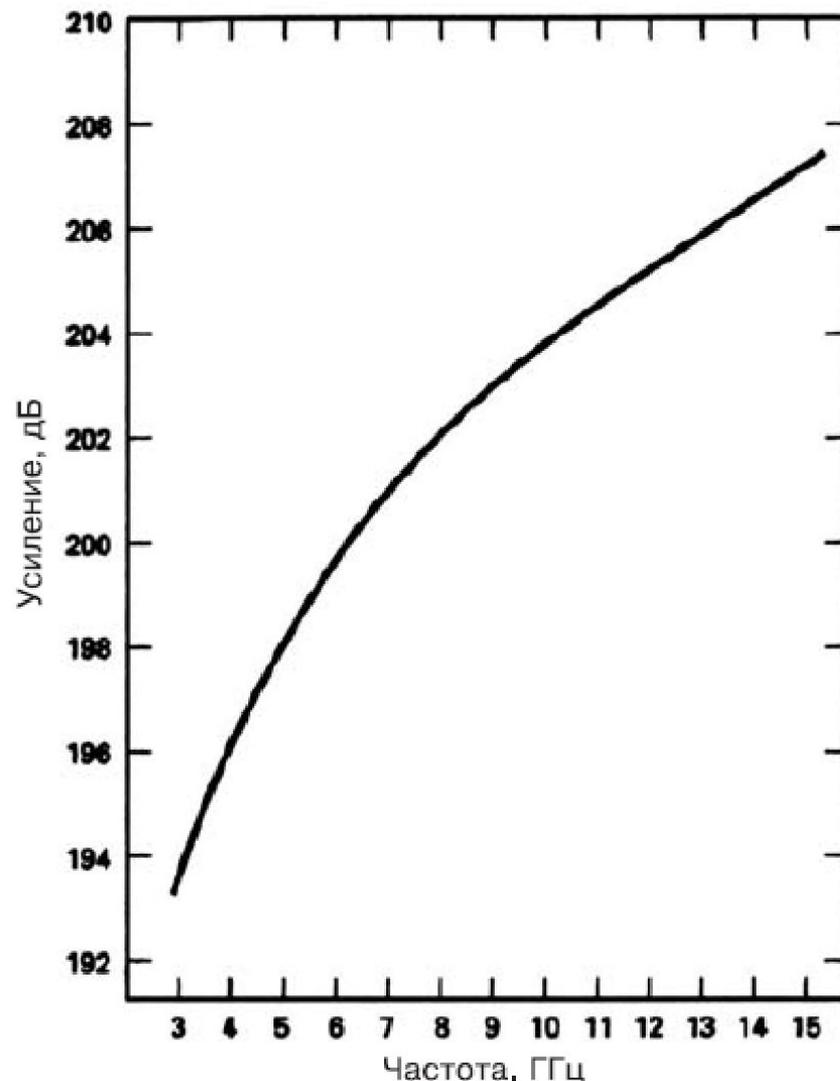
Выходная мощность передатчика спутника, порог насыщения	10 дБВт (10 Вт)
Потери снижения мощности передатчика спутника	0,1 дБ
Потери ответвления и в фидере спутника	0,5 дБ
Усиление антенны спутника (по рис. 25.27, 0,37 м на 12 ГГц)	30,8 дБ
Дополнительное затухание в атмосфере	0,4 дБ
Потери в свободном пространстве (по рис. 25.28 на 12 ГГц)	205,6 дБ
Усиление антенны наземной станции (15 м на 12 ГГц)	62 дБ
Потери ответвления и в фидере наземной станции	0 дБ
Эквивалентная шумовая температура наземной станции	270 °К
Отношение $G/T_e$ приемника наземной станции	37,7 дБ/°К
Скорость передачи	120 Мбит/сек
Вид модуляции	ФМ8

Усиление параболической антенны  $A$ ,  $\text{дБ} = 10 \log \eta [\pi D / \lambda]^2$ , где  $D$  — диаметр антенны;  $\lambda$  — длина волны;  $\eta$  — КПД антенны. Здесь принято  $\eta = 0,55$ . Для 100 % КПД следует добавить 2,66 дБ к найденному значению



Поправка  
на угол возвышения

Угол	+ дБ
90°	0
45°	0.44
0°	1.33

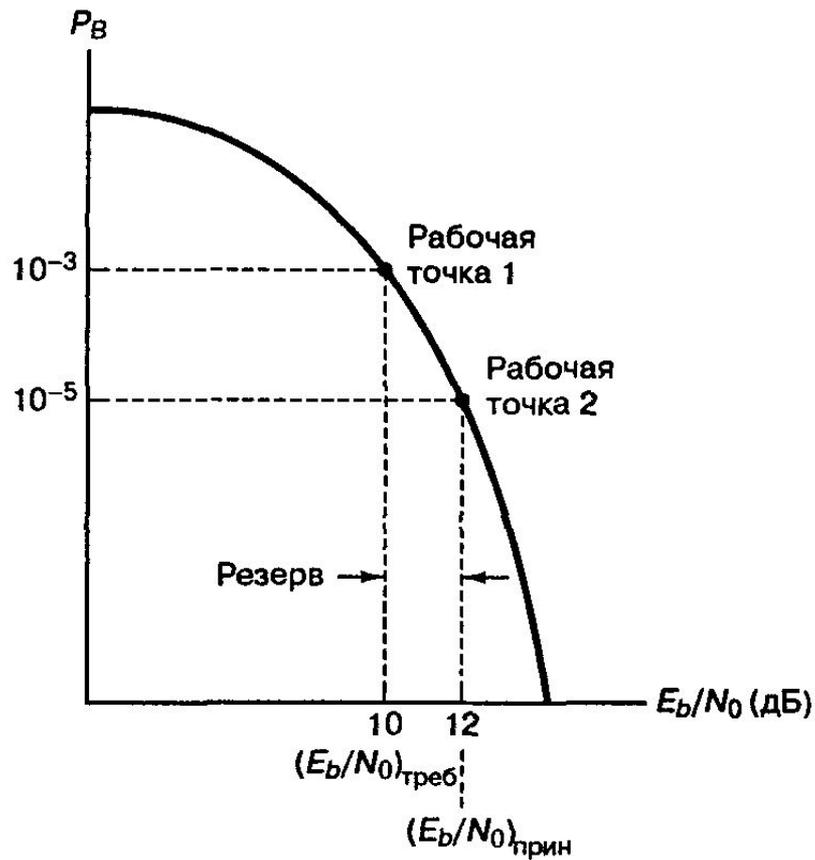


Потери свободного пространства  $L_p$ , вычисленные по соотношению  $L_p = 183,5 + 20 \log f$  [ГГц], угле возвышения  $90^\circ$  и расстоянии 35 930 км

Направление «Земля – спутник»

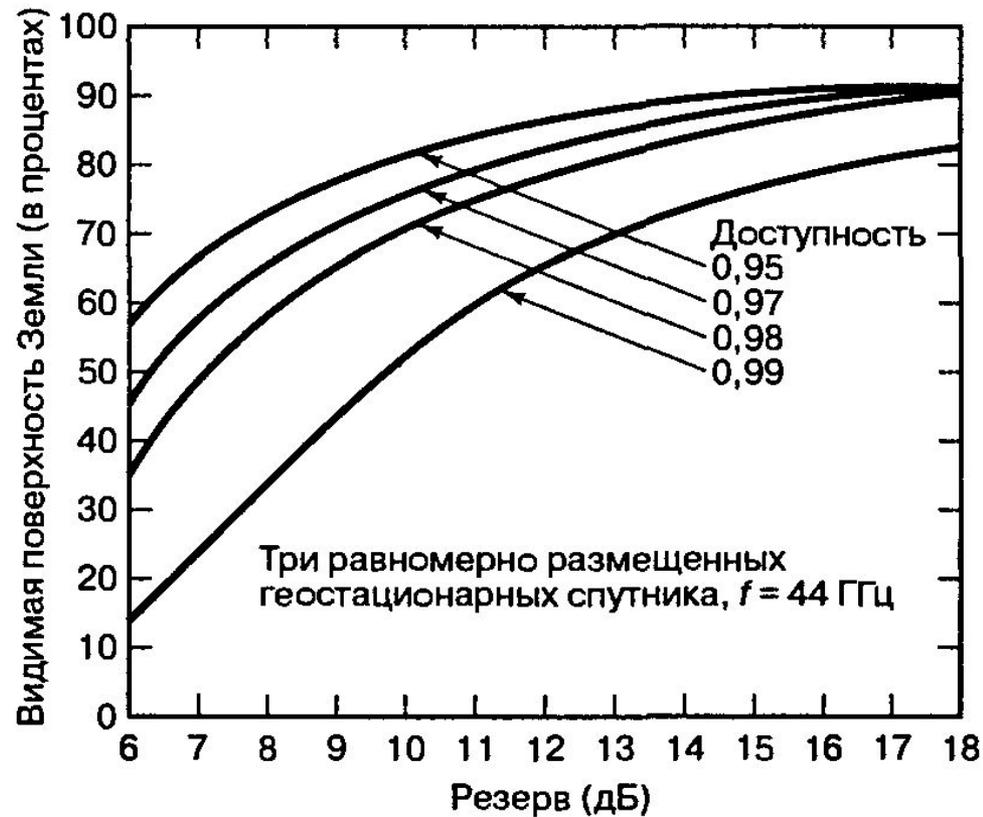
Выходная мощность передатчика наземной станции, порог насыщения	33 дБВт (2000 Вт)
Потери снижения мощности	3 дБ
Потери ответвления и в фидере наземной станции	4 дБ
Усиление антенны наземной станции	64 дБ
ЭИИМ наземной станции	90 дБВт
Дополнительное затухание в атмосфере	0,6 дБ
Потери в свободном пространстве	206,5 дБ
Плотность мощности несущего сигнала спутника	-117,1 дБВт
Потери ответвления и в фидере спутника	0 дБ
Отношение $G/T_e$ приемника спутника	-5,3 дБ/°К
Отношение $C/T_e$ приемника спутника	-122,4 дБВт/°К
Отношение $C/N_0$ приемника спутника	106,2 дБ
Отношение $C/N$ приемника спутника	30,2 дБ
Отношение $E_b/N_0$ приемника спутника	25,4 дБ
Скорость передачи	120 Мбит/сек
Вид модуляции	ФМ8

Направление «спутник – Земля»	
Выходная мощность передатчика спутника, порог насыщения	10 дБВт (10 Вт)
Потери снижения мощности передатчика спутника	0,1 дБ
Потери ответвления и в фидере спутника	0,5 дБ
Усиление антенны спутника	30,8 дБ
ЭИИМ спутника	40,2 дБВт
Дополнительное затухание в атмосфере	0,4 дБ
Потери в свободном пространстве	205,6 дБ
Усиление антенны наземной станции	62 дБ
Эквивалентная шумовая температура наземной станции	270 °К
Потери ответвления и в фидере наземной станции	0 дБ
Отношение $G/T_e$ приемника наземной станции	37,7 дБ/°К
Плотность мощности несущего сигнала базовой станции	-165,8 дБВт
Отношение $C/T_e$ приемника наземной станции	-128,1 дБВт/°К
Отношение $C/N_0$ приемника наземной станции	100,5 дБ
Отношение $C/N$ приемника наземной станции	24,5 дБ
Отношение $E_b/N_0$ приемника наземной станции	19,7 дБ
Скорость передачи	120 Мбит/сек
Вид модуляции	ФМ8



Разность в децибелах между  $(E_b/N_0)_{\text{прин}}$  и  $(E_b/N_0)_{\text{треб}}$  дает энергетический резерв линии связи:

$$M(\text{дБ}) = \left( \frac{E_b}{N_0} \right)_{\text{прин}} (\text{дБ}) - \left( \frac{E_b}{N_0} \right)_{\text{треб}} (\text{дБ})$$



*Рис. 5.10. Зависимость охвата земной поверхности от энергетического запаса линии связи при различных значениях доступности канала. (Перепечатано с разрешения Lincoln Laboratory из L. M. Schwab. "World-Wide Link Availability for Geostationary and Critically Inclined Orbits Including Rain Effects", Lincoln Laboratory, Rep. DCA-9, Jan., 27, 1981, Fig. 14, p. 38)*

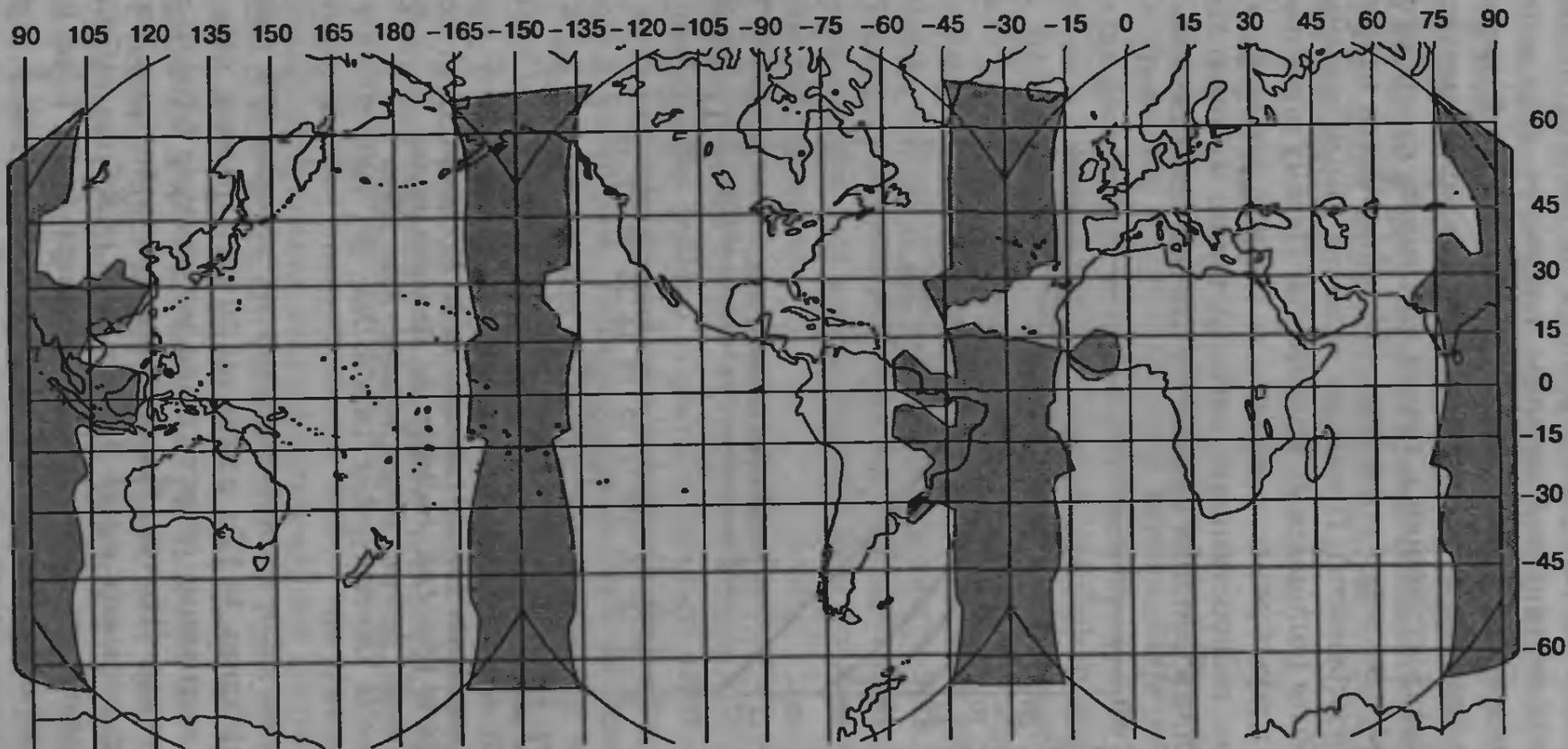


Рис. 5.11. Зависимость охвата земной поверхности (незатененные области) от энергетического запаса линии связи при 0,99 доступности канала для трех равномерно размещенных геостационарных спутников;  $f = 44$  ГГц, энергетический запас канала равен 14 дБ. (Перепечатано с разрешения Lincoln Laboratory из L. M. Schwab. "World-Wide Link Availability for Geostationary and Critically Inclined Orbits Including Rain Effects", Lincoln Laboratory, Rep. DCA-9, Jan., 27, 1981, Fig. 17, p. 42.)

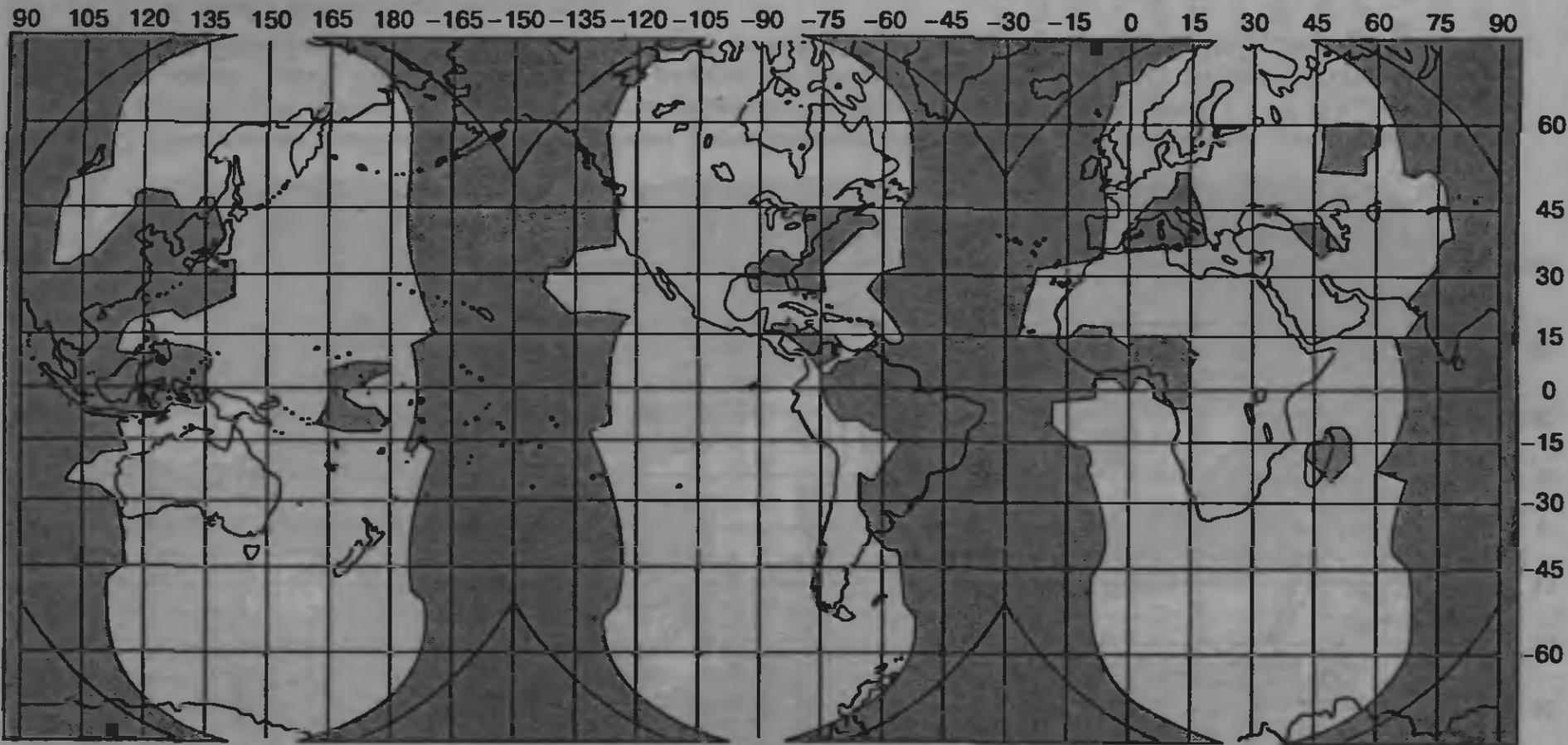


Рис. 5.12. Зависимость охвата земной поверхности (незатененные области) от энергетического запаса линии связи при 0,99 доступности канала для трех равномерно размещенных геостационарных спутников;  $f = 44$  ГГц, энергетический запас канала равен 10 дБ. (Перепечатано с разрешения Lincoln Laboratory из L. M. Schwab. "World-Wide Link Availability for Geostationary and Critically Inclined Orbits Including Rain Effects", Lincoln Laboratory, Rep. DCA-9, Jan., 27, 1981, Fig. 18, p. 43.)

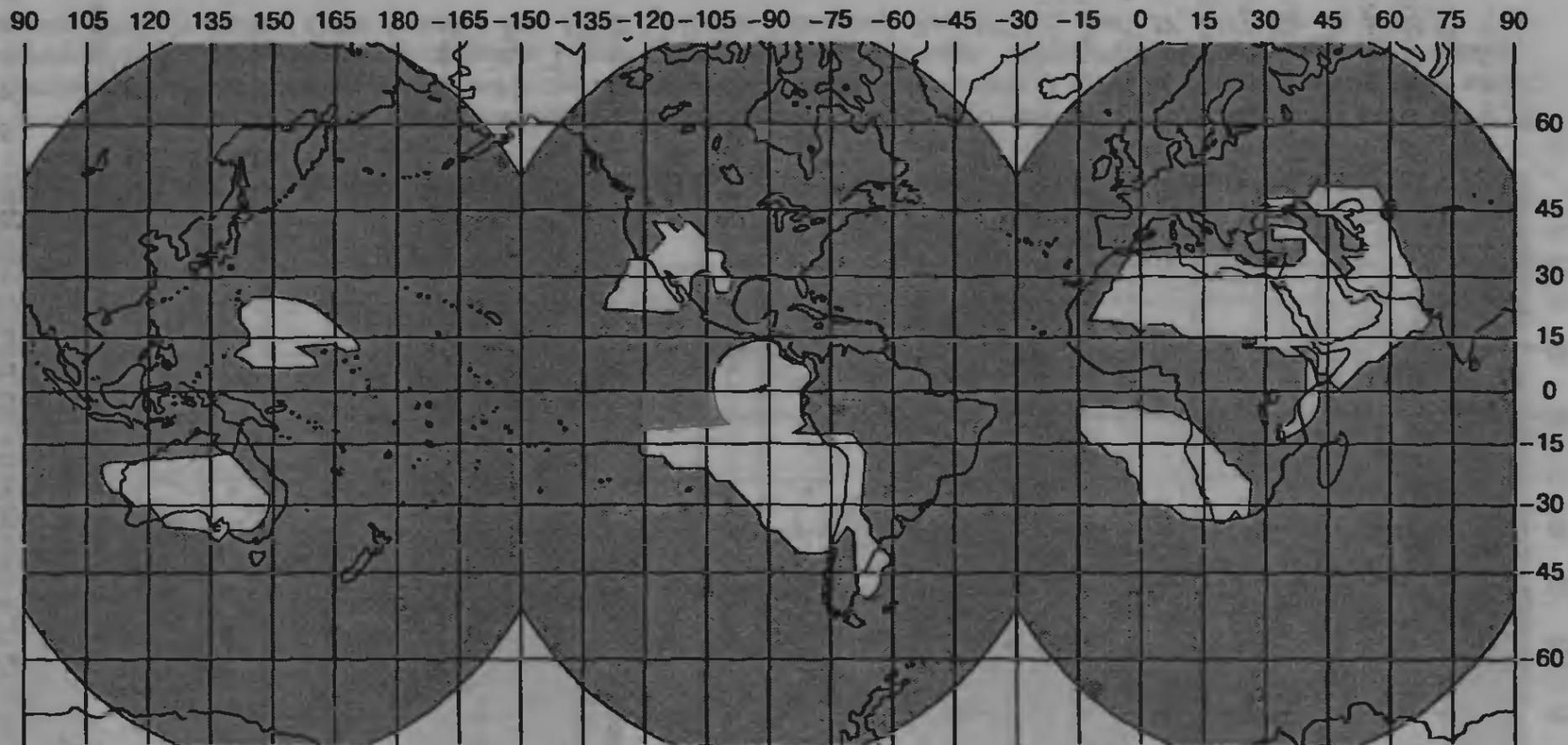


Рис. 5.13. Зависимость охвата земной поверхности (незатененные области) от энергетического запаса линии связи при 0,99 доступности канала для трех равномерно размещенных геостационарных спутников;  $f = 44$  ГГц, энергетический запас канала равен 6 дБ. (Перепечатано с разрешения Lincoln Laboratory из L. M. Schwab. "World-Wide Link Availability for Geostationary and Critically Inclined Orbits Including Rain Effects", Lincoln Laboratory, Rep. DCA-9, Jan., 27, 1981, Fig. 19, p. 44.)