

Рекомендация МСЭ-R P.1511-3 (08/2024)

Серия Р: Распространение радиоволн

**Топография для моделирования
распространения на трассе Земля-космос**



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-Т/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: <https://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>, где также содержатся Руководящие принципы по выполнению общей патентной политики МСЭ-Т/МСЭ-R/ИСО/МЭК и база данных патентной информации МСЭ-R.

Серии Рекомендаций МСЭ-R

(Представлены также в онлайн-форме по адресу: <https://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, 2025 г.

© ITU 2025

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.1511-3

Топография для моделирования распространения на трассе Земля-космос

(Вопрос МСЭ-R 214/3)

(2001-2015-2019-2024)

Сфера применения

В настоящей Рекомендации представлены глобальные топографические данные, информация о географических координатах и данные о высоте для прогнозирования влияния условий распространения на трассах Земля–космос в Рекомендациях МСЭ-R серии Р.

Ключевые слова

Топография, географические координаты, геодезическая высота, ортометрическая высота, эллипсоид, геоид, волна геоида

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

a) что для прогнозирования ослабления и рассеяния необходима информация о топографии поверхности;

b) что такая информация необходима для всех точек земного шара, в особенности если требуется расчет в региональном или континентальном масштабе,

рекомендует

1 использовать данные, приведенные в Приложении 1, для получения значений топографической высоты поверхности Земли над средним уровнем моря, если отсутствуют местные данные или данные с более высоким пространственным разрешением;

2 использовать метод, приведенный в Приложении 1, для преобразования значений высоты над поверхностью эллипсоида WGS-84 в значения высоты над поверхностью геоида WGS-84 (т. е. высоты над средним уровнем моря) или наоборот, если отсутствуют местные данные или данные с более высоким пространственным разрешением.

3 использовать метод, приведенный в Приложении 1, для расчета углов визирования и расстояния между двумя станциями в геодезических координатах.

Сокращения/аббревиатуры

EGM Earth Gravitational Model

Гравитационная модель Земли

WGS World Geodetic System

Всемирная геодезическая система

Соответствующие Рекомендации МСЭ-R

Рекомендация МСЭ-R P.618

Рекомендация МСЭ-R P.676

Рекомендация МСЭ-R P.836

Рекомендация МСЭ-R P.1144

Рекомендация МСЭ-R P.2145

ПРИМЕЧАНИЕ. – Следует использовать последнюю действующую версию/редакцию Рекомендации.

Условные обозначения

a	большая полуось (экваториальный радиус)
b	малая полуось (полярный радиус)
f	коэффициент сплюснутости
Φ	геоцентрическая широта
φ	геодезическая широта
$R(\varphi)$	геоцентрический радиус Земли в зависимости от геодезической широты
R_1	средний радиус Земли
R_2	радиус сферы, площадь которой равна площади Земли
R_3	радиус сферы, объем которой равен объему Земли
$h_{EGM2008}$	волна геоида (высота геоида WGS-84 относительно эллипсоида WGS-84)
$h_{ellipsoid}$	геодезическая высота над поверхностью эллипсоида WGS-84
h_{geoid}	ортометрическая высота над поверхностью геоида WGS-84
R_{xyz}	3-мерная матрица поворота
N_s	радиус кривизны в главном вертикале на целевой геодезической широте
N_g	радиус кривизны в главном вертикале на исходной геодезической широте
λ	долгота (положение относительно нулевого опорного меридиана)
α	угол геодезического азимута
υ	геодезический угол места
R	наклонная дальность в свободном пространстве

СОДЕРЖАНИЕ*Стр.*

Приложение 1	3
1 Топография	3
1.1 Топографическая высота.....	3
2 Всемирная система координат WGS-84.....	4
2.1 Референц-эллипсоид WGS-84	4
2.2 Референц-геоид WGS-84.....	5
3 Вычисление углов визирования и дальности между двумя станциями в геодезических координатах	6

Приложение 1

1 Топография

В следующих разделах описаны методы прогнозирования или вычисления высот для трех различных типов поверхности Земли:

Топографическая высота: топографическая высота, которой посвящен п. 1.1, представляет собой высоту физической поверхности Земли над средним уровнем моря, которая может быть весьма неравномерной. Для суши это рельеф суши, а для воды (например, океанов, морей и озер) – поверхность воды.

Референц-эллипсоид WGS-84: референц-эллипсоид WGS-84, описанный в п. 2, представляет собой простую аппроксимацию фигуры и гравитационного поля Земли. Эллипсоид WGS-84 аппроксимирует средний уровень моря с точностью ± 100 м. Типовые приемники радионавигационных систем сообщают данные о высоте относительно референц-эллипсоида WGS-84.

Референц-геоид WGS-84: референц-геоид WGS-84, описанный в п. 2, представляет собой комбинацию референц-эллипсоида WGS-84 и гравитационной модели Земли EGM2008, которая характеризует волну эквипотенциальной поверхности гравитационного поля Земли. Поверхность референц-геоида WGS-84 является опорной для отсчета среднего уровня моря.

1.1 Топографическая высота

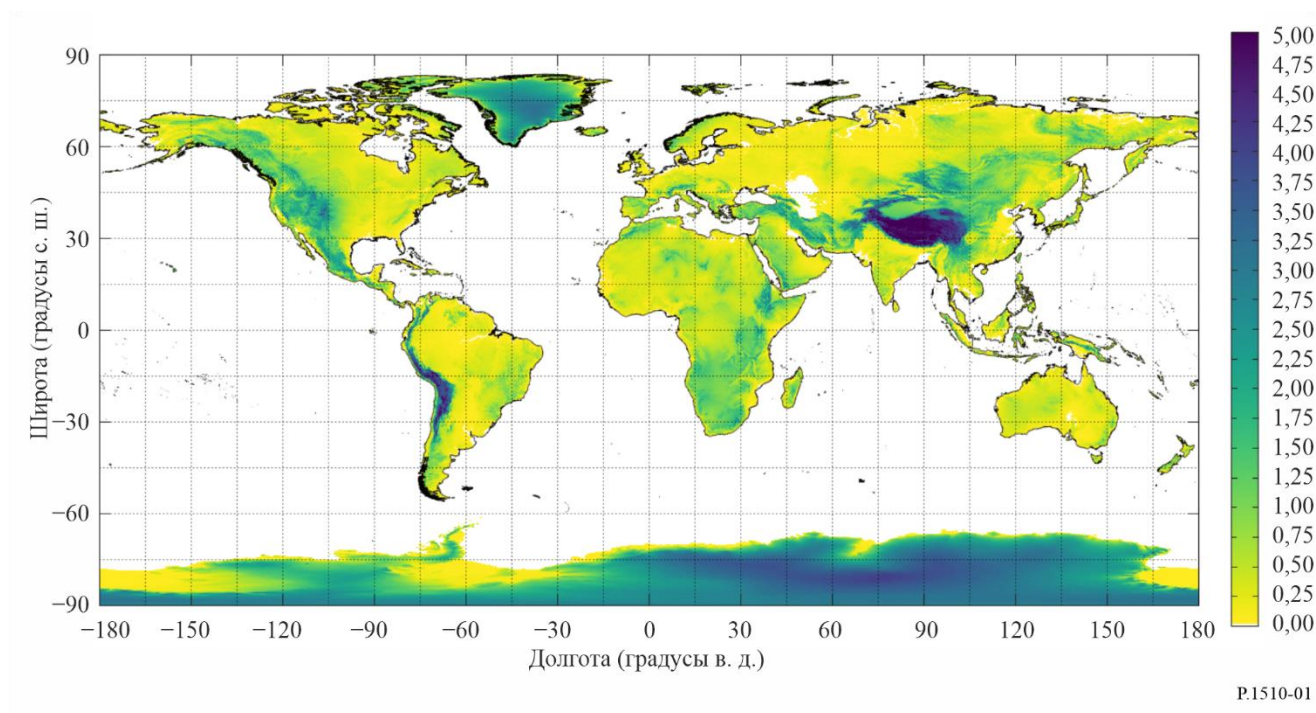
Топографическая высота определяется как высота поверхности Земли над средним уровнем моря. Значения топографической высоты (м) являются неотъемлемой частью настоящей Рекомендации и доступны в формате цифровой карты в файле R-REC-P1511-3-1.zip, вложенном в дополнительный файл [R-REC-P.1511-3-202408-I!!ZIP-E](#).

Данные о топографической высоте представлены в виде сетки с шагом $1/12^\circ$ по долготе и широте. Топографическая высота местоположений, не совпадающих с узловыми точками, может быть получена путем бикубической интерполяции по значениям в 16 ближайших узловых точках, согласно описанию в Приложении 1 к Рекомендации МСЭ-R P.1144.

Карта мира с указанием топографической высоты поверхности Земли над средним уровнем моря представлена на рисунке 1.

РИСУНОК 1

Топографическая высота поверхности Земли над средним уровнем моря (км)



Информация о береговых линиях и границах стран может быть получена по цифровой карте мира МСЭ, которая доступна в БР.

2 Всемирная система координат WGS-84

Во Всемирной системе координат WGS-84 поверхность Земли имеет вид геоида, представляющего собой эквипотенциальную поверхность гравитационного поля Земли, приблизительно соответствующую среднему уровню моря. Геоид является комбинацией референц-эллипсоида и гравитационной модели Земли (EGM).

Широты и долготы в Рекомендациях МСЭ-R серии Р, если не указано иное, являются геодезическими, а не геоцентрическими, то есть эти широты и долготы определяются относительно эллипсоида WGS-84.

2.1 Референц-эллипсоид WGS-84

Референц-эллипсоид WGS-84 определяется значением большой (экваториальной) полуоси a , где $a = 6\,378,137$ км, и коэффициентом сплюснутости $1/f$, где $f = 298,257\,223\,563$.

Малая (полярная) полуось b определяется как $b = a(1 - f)$, где $b \approx 6\,356,752\,314\,245$ км.

Геоцентрический радиус Земли $R(\varphi)$ на геодезической широте φ равен:

$$R(\varphi) = \sqrt{\frac{(a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi)^2}{(a \cos \varphi)^2 + (b \sin \varphi)^2}} \quad (1)$$

Для местоположения на поверхности референц-эллипсоида WGS-84 соотношение между геоцентрической широтой Φ и геодезической широтой φ равно:

$$\tan \Phi = (1 - f)^2 \tan \varphi \quad (2)$$

При этом три значения радиуса Земли определяются следующим образом:

Параметр	Обозначение	Значение (км)
Средний радиус Земли	R_1	6 371,008 771 4
Радиус сферы, площадь которой равна площади Земли	R_2	6 371,007 181 0
Радиус сферы, объем которой равен объему Земли	R_3	6 371,000 790 0

Средний радиус Земли определяется как среднее значение трех полуосей, т. е. $(2a + b)/3$. R_1 , R_2 и R_3 хорошо аппроксимируются значением 6371,0 км.

2.2 Референц-геоид WGS-84

Высота в Рекомендациях МСЭ-R серии Р, если не указано иное, является высотой над средним уровнем моря, определяемой геоидом WGS-84. Разность высот геоида WGS-84 и эллипсоида WGS-84 представляет собой волну геоида $h_{EGM2008}$, определяемую в гравитационной модели Земли 2008 года (EGM2008) Национального агентства геопространственной разведки (NGA) США.

Для любого местоположения, находящегося на высоте над поверхностью эллипсоида $h_{ellipsoid}$, высота над поверхностью геоида h_{geoid} и $h_{EGM2008}$ соотносятся по формуле:

$$h_{ellipsoid} = h_{EGM2008} + h_{geoid} \quad (3)$$

или

$$h_{geoid} = h_{ellipsoid} - h_{EGM2008} \quad (4)$$

Для простоты на практике типовые приемники радионавигационных систем сообщают значения высоты относительно поверхности эллипсоида WGS-84 $h_{ellipsoid}$. Для преобразования высоты над поверхностью эллипсоида WGS-84 в высоту над поверхностью геоида WGS-84 можно использовать уравнение (4).

Значения высоты $h_{EGM2008}$ (м) в бесприливной системе¹ являются неотъемлемой частью настоящей Рекомендации и доступны в формате цифровой карты в файле R15-SG03-C-0121!P2!ZIP-E.zip, вложенном в дополнительный файл R-REC-P.1511-2-201908.zip.

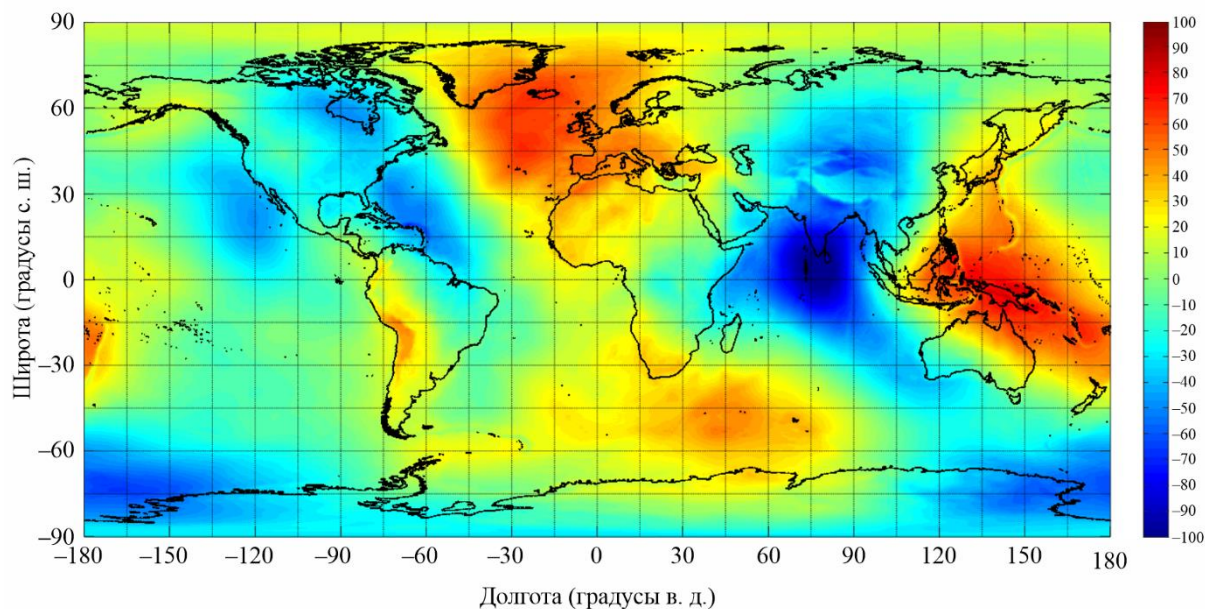
Данные представлены в виде сетки с шагом $1/12^\circ$ по долготе и широте. Для местоположений, не совпадающих с узловыми точками, высота $h_{EGM2008}$ в требуемом местоположении может быть получена путем бикубической интерполяции по значениям в 16 ближайших узловых точках, согласно описанию в Приложении 1 к Рекомендации МСЭ-R P.1144.

Карта мира высот $h_{EGM2008}$ показана на рисунке 2, где максимальное абсолютное значение $h_{EGM2008}$ составляет ~ 100 м.

Некоторые комплексные продукты обработки данных серии Р со значениями высот над средним уровнем моря были получены с использованием гравитационной модели Земли 1996 года (EGM96) Национального агентства геопространственной разведки США, а не EGM2008. По сравнению с EGM96 в модели EGM2008 значительно улучшены пространственное разрешение и точность, но при этом значение общей среднеквадратической разности между EGM2008 и EGM96 составляет менее 1 м.

¹ В бесприливной системе деформация Земли и приливные эффекты Солнца и Луны игнорируются.

РИСУНОК 2

Волна геоида $h_{EGM2008}$ в модели EGM2008 (м)

P.1511-02

3 Вычисление углов визирования и дальности между двумя станциями в геодезических координатах

Углы визирования в свободном пространстве и наклонная дальность в свободном пространстве между двумя станциями в геодезических координатах могут быть рассчитаны следующим образом:

- φ_g : геодезическая широта в исходной точке;
- λ_g : долгота в исходной точке;
- h_g : высота исходной точки над средним уровнем моря (например, над референц-эллипсоидом WGS-84) (км);
- φ_s : геодезическая широта в целевой точке;
- λ_s : долгота в целевой точке;
- h_s : высота целевой точки над средним уровнем моря (например, над референц-эллипсоидом WGS-84) (км);
- α : угол геодезического азимута в свободном пространстве от исходной точки до целевой точки;
- ν : геодезический угол места в свободном пространстве от исходной точки до целевой точки;
- R : наклонная дальность в свободном пространстве между исходной и целевой точками,

в то время как a и f определены в п. 2.1.

Этап 1. Вычисляется:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_g \\ y_g \\ z_g \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где:

$$\begin{bmatrix} x_g \\ y_g \\ z_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N_g + h_g) \cos \varphi_g \cos \lambda_g \\ (N_g + h_g) \cos \varphi_g \sin \lambda_g \\ [N_g(1-f)^2 + h_g] \sin \varphi_g \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N_s + h_s) \cos \varphi_s \cos \lambda_s \\ (N_s + h_s) \cos \varphi_s \sin \lambda_s \\ [N_s(1-f)^2 + h_s] \sin \varphi_s \end{bmatrix} \quad (7)$$

и

$$N_g = \frac{\alpha}{\sqrt{1-(2f-f^2)\sin^2(\varphi_g)}} \quad (8a)$$

$$N_s = \frac{\alpha}{\sqrt{1-(2f-f^2)\sin^2(\varphi_s)}} \quad (8b)$$

Этап 2. Вычисляется:

$$\begin{bmatrix} e \\ n \\ u \end{bmatrix} = [R_{xyz}] \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где:

$$[R_{xyz}] = \begin{bmatrix} -\sin \lambda_g & \cos \lambda_g & 0 \\ -\sin \varphi_g \cos \lambda_g & -\sin \varphi_g \sin \lambda_g & \cos \varphi_g \\ \cos \varphi_g \cos \lambda_g & \cos \varphi_g \sin \lambda_g & \sin \varphi_g \end{bmatrix} \quad (10)$$

Этап 3. Затем v , угол места (т. е. вертикальный) в исходной точке в плоскости, содержащей геодезическую вертикаль (т. е. нормаль к эллипсоиду), измеряется относительно местного геодезического горизонта; α , азимутальный угол в исходной точке в плоскости местного геодезического горизонта, измеряется по часовой стрелке от геодезического севера; и R , наклонная дальность в свободном пространстве между исходной и целевой точками, вычисляется следующим образом:

$$v = \tan^{-1} \frac{u}{\sqrt{e^2 + n^2}} \quad (11)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{e}{n} \quad (12)$$

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (\text{км}) \quad (13)$$

$\tan^{-1} \frac{y}{x}$ рассчитывается с помощью функции четырехквadrантного арктангенса $\text{atan2}(y, x)$, которая вычисляет угол против часовой стрелки между положительной осью x и лучом от исходной точки до точки (x, y) в декартовой плоскости. Условно считается, что $\text{atan2}(0,0) = 0$.

ПРИМЕЧАНИЕ. – В Matlab и Octave эти вычисления выполняются с использованием функции `geodetic2aer`.