**Рекомендация** **МСЭ-R P.1511-3**

**(08/2024)**

Серия P: 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 онлайновой 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 P.

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](https://www.itu.int/rec/R-REC-P.618/en)

Рекомендация [МСЭ-R P.676](https://www.itu.int/rec/R-REC-P.676/en)

Рекомендация [МСЭ-R P.836](https://www.itu.int/rec/R-REC-P.836/en)

Рекомендация [МСЭ-R P.1144](https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1144/en)

Рекомендация [МСЭ-R P.2145](https://www.itu.int/rec/R-REC-P.2145/en)

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

Условные обозначения

большая полуось (экваториальный радиус)

малая полуось (полярный радиус)

коэффициент сплюснутости

Φ геоцентрическая широта

φ геодезическая широта

*R*(φ) геоцентрический радиус Земли в зависимости от геодезической широты

средний радиус Земли

радиус сферы, площадь которой равна площади Земли

радиус сферы, объем которой равен объему Земли

волна геоида (высота геоида WGS-84 относительно эллипсоида WGS-84)

геодезическая высота над поверхностью эллипсоида WGS-84

ортометрическая высота над поверхностью геоида WGS-84

3-мерная матрица поворота

радиус кривизны в главном вертикале на целевой геодезической широте

радиус кривизны в главном вертикале на исходной геодезической широте

λ долгота (положение относительно нулевого опорного меридиана)

α угол геодезического азимута

υ геодезический угол места

наклонная дальность в свободном пространстве

СОДЕРЖАНИЕ

*Стр.*

[Приложение 1 3](#_Toc189472293)

[1 Топография 3](#_Toc189472294)

[1.1 Топографическая высота 3](#_Toc189472295)

[2 Всемирная система координат WGS-84 4](#_Toc189472296)

[2.1 Референц-эллипсоид WGS-84 4](#_Toc189472297)

[2.2 Референц-геоид WGS-84 5](#_Toc189472298)

[3 Вычисление углов визирования и дальности между двумя станциями в геодезических координатах 6](#_Toc189472299)

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](https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1511-3-202408-I/en).

Данные о топографической высоте представлены в виде сетки с шагом 1/12° 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 Р.1144](https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1144/en).

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)

A map of the world

Description automatically generated

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 P, 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 , где *a* = 6 378,137 км, и коэффициентом сплюснутости , где *f* = 298,257 223 563.

Малая (полярная) полуось определяется как , где *b ≈* 6 356,752 314 245 км.

Геоцентрический радиус Земли на геодезической широте φ равен:



(1)

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



(2)

При этом три значения радиуса Земли определяются следующим образом:

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

Средний радиус Земли определяется как среднее значение трех полуосей, т. е. . , и хорошо аппроксимируются значением 6371,0 км.

## 2.2 Референц-геоид WGS-84

Высота в Рекомендациях МСЭ-R серии P, 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 определяемую в гравитационной модели Земли 2008 года (EGM2008) Национального агентства геопространственной разведки (NGA) США.

Для любого местоположения, находящегося на высоте над поверхностью эллипсоида , высота над поверхностью геоида и соотносятся по формуле:

(3)

или

(4)

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

Значения высоты (м) в бесприливной системе[[1]](#footnote-1) 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](https://www.itu.int/dms_ties/itu-r/md/23/sg03/c/R23-SG03-C-0010!P1!ZIP-E.zip).

Данные представлены в виде сетки с шагом 1/12° по долготе и широте. Для местоположений, не совпадающих с узловыми точками, высота 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 Р.1144](https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1144/en).

Карта мира высот показана на рисунке 2, где максимальное абсолютное значение 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.

рисунок 2

Волна геоида в модели EGM2008 (м)

A map of the world

Description automatically generated

# 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:

: геодезическая широта в исходной точке;



: долгота в исходной точке;

: высота исходной точки над средним уровнем моря (например, над референц-эллипсоидом WGS-84) (км);

: геодезическая широта в целевой точке;

: долгота в целевой точке;

: 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 и определены в п. 2.1.

Этап 1. Вычисляется:

, (5)

где:

(6)

(7)

и

(8a)

(8b)

Этап 2. Вычисляется:

, (9)

где:

(10)

Этап 3. Затем ν, 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:



(11)

(12)

(км) (13)

рассчитывается с помощью функции четырехквадрантного арктангенса , которая вычисляет угол против часовой стрелки между положительной осью и лучом от исходной точки до точки () в декартовой плоскости. Условно считается, что .

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

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

1. В бесприливной системе деформация Земли и приливные эффекты Солнца и Луны игнорируются. [↑](#footnote-ref-1)