

Рекомендация МСЭ-R Р.1144-12 (08/2023)

Серия Р: Распространение радиоволн

**Руководство по использованию методов
прогнозирования распространения
радиоволн, разработанных
3-й Исследовательской комиссией
по радиосвязи**



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 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/ru>, 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/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, 2024 г.

© ITU 2024

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.1144-12

Руководство по использованию методов прогнозирования распространения радиоволн, разработанных 3-й Исследовательской комиссией по радиосвязи

(1995-1999-2001-2001-2007-2009-2012-2015-06/2017-12/2017-2019-2021-2023)

Сфера применения

Настоящая Рекомендация содержит руководство по использованию методов прогнозирования распространения радиоволн, разработанных 3-й Исследовательской комиссией по радиосвязи. В ней пользователям рекомендуются наиболее подходящие методы для конкретных применений, а также представлена информация о пределах, требуемой входящей информации и о результатах для каждого из этих методов.

Ключевые слова

Распространение радиоволн, методы прогнозирования, цифровые продукты, пространственная интерполяция, система точек отсчета высоты.

Глоссарий

Символ	Описание
n	число точек (узлов) квадратуры Гаусса
W_i	веса квадратуры Гаусса
X_i	точки квадратуры Гаусса

Другие символы, не указанные в таблице выше, носят промежуточный характер и не имеют определения.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

что необходимо оказать помощь пользователям Рекомендаций МСЭ-R серии Р (разработанных 3-й Исследовательской комиссией по радиосвязи),

рекомендует,

1 рассматривать информацию, содержащуюся в таблице 1, для руководства по применению различных методов прогнозирования распространения радиоволн, содержащихся в Рекомендациях МСЭ-R серии Р (разработанных 3-й Исследовательской комиссией по радиосвязи);

2 рассматривать информацию, содержащуюся в таблице 2 и Приложении 1, для руководства по использованию различных цифровых карт геофизических параметров, необходимых для применения методов прогнозирования распространения радиоволн, упомянутых в пункте 1 раздела *рекомендует* выше.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – По каждой Рекомендации МСЭ-R в таблице 1 представлена соответствующая информация в колонках, которая определяет:

Применение: служба(ы) или применение, для которых предназначена Рекомендация.

Тип: ситуация, на которую распространяется Рекомендация, например "из пункта в пункт", "из пункта в зону", "прямая видимость" и т. п.

Результат: значение параметров результата, полученного по методу, предусмотренному в Рекомендации, например основные потери передачи.

Частота: применяемый в Рекомендации диапазон частоты.

Расстояние: применяемая в Рекомендации дальность действия.

% времени: применяемые в Рекомендации значения процентной доли времени или диапазоны значений; % времени представляет собой процентную долю времени, которую превышает прогнозируемый сигнал в течение среднего года.

% местоположений: применяемый в Рекомендации диапазон процентной доли местоположений; % местоположений представляет собой процентную долю местоположений в пределах, предположим, квадрата со стороной 100–200 м, которую превышает прогнозируемый сигнал.

Высота терминала: применяемый в Рекомендации диапазон высоты оконечной антенны.

Входные данные: список параметров, используемых на основе метода, содержащегося в Рекомендации; этот список составляется с учетом значения параметров и в некоторых случаях могут использоваться значения по умолчанию.

Информация, содержащаяся в таблице 1, уже представлена в самих Рекомендациях; однако таблица позволяет пользователям быстро определять возможности (и ограничения) Рекомендаций без необходимости вести поиск во всем тексте.

ТАБЛИЦА 1

Методы прогнозирования распространения радиоволн МСЭ-R

Метод	Название	Применение	Тип	Результат	Частота	Расстояние	% времени	% местоположений	Высота терминала	Входные данные
Рек. МСЭ-R P.368	Кривые распространения земной волны для частот между 10 кГц и 30 МГц	Все службы	Из пункта в пункт	Напряженность поля	От 10 кГц до 30 МГц	От 1 до 10 000 км	Не применяется	Не применяется	Земного базирования	Частота Проводимость земной поверхности
Рек. МСЭ-R P.452	Процедура прогнозирования для оценки помех между станциями, находящимися на поверхности Земли, на частотах выше приблизительно 0,1 ГГц	Службы, использующие станции на поверхности Земли; помехи	Из пункта в пункт	Основные потери передачи	От 100 МГц до 50 ГГц	Не уточняется, но до радиогоризонта и далее	От 0,001 до 50 Средний год и худший месяц	Не применяется	Пределы не установлены, в приземном слое атмосферы. (Не предназначен для применений воздушной службы.)	Данные о характере трассы Частота Процентная доля времени Высота антенны Tx Высота антенны Rx Широта и долгота Tx Широта и долгота Rx Метеорологические данные Поляризация
Рек. МСЭ-R P.528	Кривые распространения радиоволн для воздушной подвижной и радионавигационной служб, работающих в диапазонах ОВЧ, УВЧ и СВЧ	Воздушная подвижная	Из пункта в зону	Основные потери передачи	От 100 МГц до 30 ГГц	Не уточняется, но до радиогоризонта и далее. Для применений воздушной службы 0 км расстояния по дуге большого круга не означает 0 км длины трассы.	1–99	Не применяется	Высота терминала: 1,5–20 000 м	Расстояние Высота Tx Частота Высота Rx Процент времени Поляризация
Рек. МСЭ-R P.530	Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования, требующиеся для проектирования наземных систем прямой видимости	Фиксированные линии связи прямой видимости	Из пункта в пункт Прямая видимость	Потери при распространении. Улучшение разнесения (условия чистого воздуха) XPD ⁽²⁾ Выход из строя Ошибка в показателях	Примерно от 150 МГц до 100 ГГц	До 200 км при прямой видимости	Вся процентная доля времени в условиях чистого воздуха; от 1 до 0,001 в условиях осадков ⁽¹⁾ . И худший месяц по ослаблению	Не применяется	Достаточно высокий для обеспечения установленного просвета трассы	Расстояние Высота Tx Частота Высота Rx Процентная доля времени Данные о препятствиях на трассе Данные о климате Информация о профиле местности

ТАБЛИЦА 1 (продолжение)

Метод	Название	Применение	Тип	Результат	Частота	Расстояние	% времени	% местоположений	Высота терминала	Входные данные
Рек. МСЭ-R P.533	Метод для прогнозирования рабочих характеристик ВЧ-линий	Радиовещательная Фиксированная Подвижная	Из пункта в пункт	Основные MUF Напряженность поля ионосферной радиоволны Имеющаяся мощность приемника Отношение сигнал/шум LUF Надежность схемы	От 2 до 30 МГц	От 0 до 40 000 км	Все процентные доли	Не применяется	Не применяется	Широта и долгота Tx Широта и долгота Rx Число солнечных пятен Месяц Время дня Частоты Мощность Tx Тип антенны Tx Тип антенны Rx
Рек. МСЭ-R P.534	Метод расчета напряженности поля при распространении посредством спорадического слоя E	Фиксированная Подвижная Радиовещательная	Из пункта в пункт через спорадическое E	Напряженность поля	От 30 до 100 МГц	От 0 до 4 000 км	От 0,1 до 50	Не применяется	Не применяется	Расстояние Частота
Рек. МСЭ-R P.617	Методы прогнозирования и данные о распространении радиоволн, необходимые для проектирования тропосферных радиорелейных систем	Транс-горизонтальная с фиксированными связями	Из пункта в пункт	Основные потери передачи	> 30 МГц	От 100 до 1 000 км	От 0,001 до 99,999	Не применяется	Пределы не установлены, в приземном слое атмосферы. (Не предназначено для применений воздушной службы.)	Частота Усиление антенны Tx Усиление антенны Rx Геометрия трассы
Рек. МСЭ-R P.618	Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования, необходимые для проектирования систем связи Земля-космос	Спутниковая	Из пункта в пункт	Потери при распространении Усиление разброса и (в условиях осадков) XPD ⁽²⁾	От 1 до 55 ГГц	Любая практическая высота орбиты	0,001–5 для ослабления в дожде; 0,001–50 для общего ослабления; 0,001–1 для XPD ⁽²⁾ Также худший месяц по ослаблению	Не применяется	Предел отсутствует	Метеорологические данные Частота Угол места Высота земной станции Разделение и угол между местоположениями земных станций (для усиления разброса) Диаметр и эффективность антенны (для мерцания) Угол поляризации (для XPD) ⁽²⁾

ТАБЛИЦА 1 (продолжение)

Метод	Название	Применение	Тип	Результат	Частота	Расстояние	% времени	% местоположений	Высота терминала	Входные данные
Рек. МСЭ-R P.619	Данные о распространении радиоволн, необходимые для определения помех между станциями, находящимися в космосе и на поверхности Земли	Спутниковая	Из пункта в пункт	Основные потери передачи от единичной входной помехи Основные потери передачи в условиях ясного неба для помехи от многих источников	От 0,1 до 100 ГГц	Любая практическая высота орбиты	От 0,001 до 50	Не применяется	Предел отсутствует	Частота Угол места земной станции Угловой разнос трассы Длина трассы Затухание в атмосферных газах Усиление за счет мерцания Максимально допустимое затухание полезного сигнала
Рек. МСЭ-R P.620	Данные о распространении радиоволн, требующиеся для оценки координационных расстояний в диапазоне частот от 100 МГц до 105 ГГц	Координация частот земных станций	Координация расстояний	Расстояние, при котором достигается требуемая потеря при распространении	От 100 МГц до 105 ГГц	До 1 200 км	От 0,001 до 50	Не применяется	Пределы не установлены, в приземном слое атмосферы. (Не предназначено для применений воздушной службы.)	Минимальные базовые потери при передаче Частота Процент времени Угол места земной станции
Рек. МСЭ-R P.678	Оценка изменчивости явлений распространения радиоволн и оценка риска, связанного с запасом на распространение	Модели интенсивности дождевых осадков Спутниковая	Из пункта в зону	Изменчивость явлений распространения радиоволн	От 12 до 50 ГГц	Любая практическая высота орбиты	0,01–2 для интенсивности дождевых осадков и ослабления в дожде на наклонной трассе	Не применяется	Предел отсутствует	Вероятность превышения
Рек. МСЭ-R P.679	Данные о распространении радиоволн, необходимые для проектирования спутниковых радиовещательных систем	Спутниковое радиовещание	Из пункта в зону	Избыточные потери передачи Эффект местной среды	От 0,5 до 5,1 ГГц	Любая практическая высота орбиты	Не применяется	Пределы не установлены	Пределы не установлены	Частота Угол места Особенности местной среды

ТАБЛИЦА 1 (продолжение)

Метод	Название	Применение	Тип	Результат	Частота	Расстояние	% времени	% местоположений	Высота терминала	Входные данные
Рек. МСЭ-R P.680	Данные о распространении радиоволн, необходимые для проектирования морских подвижных систем электросвязи Земля-космос	Морская подвижная спутниковая	Из пункта в пункт	Замирание на поверхности моря Продолжительность замирания Помехи (соседний спутник)	0,8–8 ГГц	Любая практическая высота орбиты	До 0,001% через распределение Райса–Накагами Предел в 0,01% для помех ⁽¹⁾	Не применяется	Предел отсутствует	Частота Угол места Максимальное усиление точки прицеливания антенны
Рек. МСЭ-R P.681	Данные о распространении радиоволн, необходимые для проектирования сухопутных подвижных систем связи Земля-космос	Сухопутная подвижная спутниковая	Из пункта в пункт	Замирание трассы Продолжительность замирания Продолжительность незамирания	От 0,8 до 20 ГГц	Любая практическая высота орбиты	Не применяется Процентная доля пройденного расстояния от 1 до 80% ⁽¹⁾	Не применяется	Предел отсутствует	Частота Угол места Процентная доля пройденного расстояния Примерный уровень оптического затенения
Рек. МСЭ-R P.682	Данные о распространении радиоволн, необходимые для проектирования воздушных подвижных систем связи Земля-космос	Воздушная подвижная спутниковая	Из пункта в пункт	Замирание на поверхности моря Множество трасс от земли и самолета во время посадки	1–2 ГГц (замирание на поверхности моря) 1–3 ГГц (множество трасс от земли)	Любая практическая высота орбиты	До 0,001% через распределение Райс–Накагами ⁽¹⁾	Не применяется	Предел отсутствует для замирания на поверхности моря До 1 км для земного отражения при посадке	Частота Угол места Поляризация Максимальное усиление точки прицеливания антенны Высота антенны
Рек. МСЭ-R P.684	Прогнозирование напряженности поля на частотах ниже приблизительно 150 кГц	Фиксированная Подвижная	Из пункта в пункт Из пункта в зону	Напряженность поля ионизирующей радиоволны	От 30 до 150 кГц	От 0 до 16 000 км	50	Не применяется	Не применяется	Широта и долгота Tx Широта и долгота Rx Расстояние Мощность Tx Частота Земные константы Время года Количество пятен на солнце Время дня

ТАБЛИЦА 1 (продолжение)

Метод	Название	Применение	Тип	Результат	Частота	Расстояние	% времени	% местоположений	Высота терминала	Входные данные
Рек. МСЭ-R P.843	Связь посредством отражения от следов метеоров	Фиксированная Подвижная Радиовещательная	Из пункта в пункт через метеор-пакеты	Полученная мощность Скорость передачи пакетов	От 30 до 100 МГц	От 100 до 1 000 км	0 до 5	Не применяется	Не применяется	Частота Расстояние Мощность Tx Усиление антенны
Рек. МСЭ-R P.1147	Прогнозирование напряженности поля пространственной волны на частотах между приблизительно 150 и 1 700 кГц	Радиовещательная	Из пункта в зону	Напряженность поля ионизирующей радиоволны	От 0,15 до 1,7 МГц	От 50 до 12 000 км	1, 10, 50	Не применяется	Не применяется	Широта и долгота Tx Широта и долгота Rx Расстояние Количество пятен на солнце Мощность Tx Частота
Рек. МСЭ-R P.1238	Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования для планирования систем радиосвязи внутри помещений и локальных зонных радиосетей в частотном диапазоне 300 МГц – 100 ГГц	Подвижная Локальная радиосеть (RLAN)	Встроенные методы распространения	Основные потери передачи Разброс задержки	От 300 МГц до 450 ГГц	В зданиях	Не применяется	Не применяется	База: около 2–3 м Подвижная: около 0,5–3 м	Частота Расстояние Факторы пола и стен
Рек. МСЭ-R P.1410	Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования, требующиеся для проектирования наземных широкополосных систем радиодоступа, работающих в диапазоне частот от 3 до 60 ГГц	Широкополосный радиодоступ	Из пункта в зону	Покрытие Временное сокращение покрытия из-за дождя	От 3 до 60 ГГц	0–5 км	От 0,001 до 1 (для расчета сокращения из-за дождя)	До 100	Предел отсутствует; 0–300 м (типичная)	Частота Размер ячейки Высота терминала Статистические параметры высоты зданий

ТАБЛИЦА 1 (продолжение)

Метод	Название	Применение	Тип	Результат	Частота	Расстояние	% времени	% местоположений	Высота терминала	Входные данные
Рек. МСЭ-R P.1411	Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования для планирования наружных систем радиосвязи малого радиуса действия и локальных радиосетей в диапазоне частот от 300 МГц до 100 ГГц	Подвижная	Методы распространения по короткой трассе	Основные потери передачи Разброс задержки	От 300 МГц до 100 ГГц	< 1 км	Не применяется	Не применяется	База: около 4–50 м Подвижная: около 0,5–3 м	Частота Расстояние Размеры улиц Высота строений
Рек. МСЭ-R P.1546	Метод прогнозирования для трасс связи "пункта с зоной" для наземных служб в диапазоне частот от 30 МГц до 4 000 МГц	Наземные службы	Из пункта в зону	Напряженность поля	От 30 до 4 000 МГц	от 1 до 1 000 км	от 1 до 50	от 1 до 99	База Tx: эффективная высота от менее от 0 м до 3 000 м Подвижная Rx: ≥ 1 м	Высота рельефа местности и наземный охват (факультативно) Классификация трассы Расстояние Высота антенны Tx Частота Процент времени Высота антенны Rx Угол просвета местности Процентная доля местоположений Градиент преломляющей способности
Рек. МСЭ-R P.1622	Методы прогнозирования, необходимые для проектирования систем Земля-космос, работающих в диапазоне частот от 20 ТГц до 375 ТГц	Спутниковая оптическая связь	Из пункта в пункт	Потеря за счет поглощения Потеря за счет рассеяния Фоновый шум Амплитудное мерцание Угол падения Отклонение луча Рассеяние луча	От 20 до 375 ТГц	Дальняя оптическая связь Земля-космос	Не применяется	Не применяется	Предел отсутствует	Длина волны Высота терминала Угол места Параметры структуры турбулентности

ТАБЛИЦА 1 (продолжение)

Метод	Название	Применение	Тип	Результат	Частота	Расстояние	% времени	% местоположений	Высота терминала	Входные данные
Рек. МСЭ-R P.1623	Метод прогнозирования динамики замирания сигнала на трассах Земля-космос	Спутниковая	Из пункта в пункт	Продолжительность замирания, спад замирания	От 10 до 50 ГГц	Любая практическая высота орбиты	Не применяется	Не применяется	Предел отсутствует	Частота Угол места Порог ослабления Ширина полосы фильтра
Рек. МСЭ-R P.1812	Метод прогнозирования распространения сигнала на конкретной трассе для наземных служб "из пункта в зону" в диапазоне частот 30–6 000 МГц	Наземные службы	Из пункта в зону	Напряженность поля	От 30 до 6 000 МГц	Не уточняется, но до радиогоризонта и далее	От 1 до 50	От 1 до 99	Пределы не установлены, в приземном слое атмосферы. (Не предназначено для применений воздушной службы.)	Данные о характере трассы Частота Процентная доля времени Высота антенны Tx Высота антенны Rx Широта и долгота Tx Широта и долгота Rx Метеорологические данные Поляризация
Рек. МСЭ-R P.1814	Методы прогнозирования, требуемые для разработки наземных оптических линий для связи в свободном пространстве	Наземная оптическая связь	Из пункта в пункт	Потеря за счет поглощения Потеря за счет рассеяния Фоновый шум Амплитудное мерцание Рассеяние луча	От 20 до 375 ТГц	Предел отсутствует	Не применяется	Не применяется	Предел отсутствует	Длина волны Видимость (в тумане) Протяженность трассы Параметры структуры турбулентности
Рек. МСЭ-R P.1853	Синтез временных рядов тропосферного ослабления	Наземная спутниковая	Из пункта в пункт	Ослабление в дожде для наземных трасс. Общее ослабление и тропосферное мерцание для трасс Земля-космос	4–40 ГГц для наземных трасс 4–55 ГГц для трасс Земля-космос	От 2 до 60 км для наземных трасс Геостационарный спутник	Не применяется	Не применяется	Предел отсутствует	Метеорологические данные Частота Угол места Высота земной станции Разделение и угол между местоположениями земных станций (для усиления разброса) Диаметр и эффективность антенны (для мерцания)

ТАБЛИЦА 1 (окончание)

Метод	Название	Применение	Тип	Результат	Частота	Расстояние	% времени	% местоположений	Высота терминала	Входные данные
Рек. МСЭ-R P.2001	Универсальная модель наземного распространения радиоволн для широкого применения в полосе частот 30 МГц – 50 ГГц	Наземные службы	Из пункта в пункт	Основные потери передачи	От 30 МГц до 50 ГГц	От 3 до 1 000 км	От 0,001 до 99,999	Не применяется	< 8 000 м над средним уровнем моря, но около поверхности Земли, в тропосфере	Данные о характере трассы Частота Процентная доля времени Высота антенны, усиление и азимутальное направление Высота антенны Rx, усиление и азимутальное направление Широта и долгота Tx Широта и долгота Rx Поляризация
Рек. МСЭ-R P.2041	Прогнозирование затухания на трассе на линиях между воздушной платформой и космосом и между воздушной платформой и поверхностью Земли	На борту воздушного судна	Из пункта в пункт	Общее ослабление	От 1 до 55 ГГц	Любая высота	От 0,001 до 50	Не применяется	Между поверхностью Земли и космосом	Метеорологические данные Частота Угол места Готовность Высота воздушной платформы Диаметр и эффективность антенны (для мерцания)

(1) Процентная доля времени сбоя; для определения готовности службы следует вычесть это значение из 100.

(2) XPD – избирательность по кросс-поляризации.

ТАБЛИЦА 2

Цифровые продукты МСЭ-R для методов прогнозирования распространения радиоволн

Рекомендация МСЭ-R	Описание	Разрешение координатной сетки	Требуемая пространственная интерполяция (см. Приложение 1)	Интерполяция по вероятности	Интерполяция переменной	Комментарии
P.452	Медианная годовая ΔN Медианная годовая N_0	$1,5^\circ \times 1,5^\circ$	Билинейная	Не применяется	Не применяется	Используемые названия файлов указаны в соответствующем файле сведений Readme ⁽²⁾
P.453	Годовые и помесечные вероятности распределения влажностной составляющей приповерхностной рефракции (Nwet)	$0,75^\circ \times 0,75^\circ$	Билинейная	Логарифмическая	Не применяется	Используемые названия файлов указаны в соответствующем файле сведений Readme ⁽²⁾
	<ul style="list-style-type: none"> Градиент рефракции в нижних 65 м атмосферы (N-единиц/км) Градиент рефракции на высоте 1 км над поверхностью Земли (N-единиц/км) Процент времени, для которого градиент рефракции в нижнем слое атмосферы толщиной 100 м < -100 N-единиц/км 	$0,75^\circ \times 0,75^\circ$	Билинейная	Не определена	Не применяется	Используемые названия файлов указаны в соответствующем файле сведений Readme ⁽²⁾
	Данные поверхностных волноводов	$1,5^\circ \times 1,5^\circ$	Билинейная	Не определена	Не применяется	См. веб-страницу с программным обеспечением для расчета ионосферного и тропосферного распространения, а также радиошума
	Данные приподнятых водноводов	$1,5^\circ \times 1,5^\circ$	Билинейная	Не определена	Не применяется	См. веб-страницу с программным обеспечением для расчета ионосферного и тропосферного распространения, а также радиошума
P.530	LogK логарифм K%, геоклиматический фактор для среднего наихудшего месяца	$0,25^\circ \times 0,25^\circ$	Билинейная	Не определена	Линейная	См. Рекомендацию по применению и использованию этих наборов данных.
	dN75 эмпирический прогноз увеличения рефракции среднего наихудшего месяца на 0,1% с высотой над самыми низкими 75 м атмосферы	$0,25^\circ \times 0,25^\circ$	Билинейная	Не определена	Линейная	См. Рекомендацию по применению и использованию этих наборов данных.
P.534	foEs, превышаемой в течение годового процента времени	$1,5^\circ \times 1,5^\circ$	Билинейная	Линейная	Не применяется	Используемые названия файлов указаны в соответствующем файле сведений Readme ⁽²⁾
P.617	Медианная годовая ΔN Медианная годовая N_0	$1,5^\circ \times 1,5^\circ$	Билинейная	Не применяется	Не применяется	Используемые названия файлов указаны в соответствующем файле сведений Readme ⁽²⁾
P.678	Карта климатического коэффициента	$0,5^\circ \times 0,5^\circ$	Билинейная	Не применяется	Не применяется	Используемые названия файлов указаны в соответствующем файле сведений Readme ⁽²⁾
P.834	<ul style="list-style-type: none"> Гармонические коэффициенты увеличения длины трассы на трассах Земля-космос Гармонические коэффициенты функций отображения гидростатической и влажной составляющих 	$1,5^\circ \times 1,5^\circ$	Билинейная	Не определена	Не применяется	Используемые названия файлов указаны в соответствующем файле сведений Readme ⁽²⁾
		$5^\circ \times 5^\circ$	Не требуется			

ТАБЛИЦА 2 (продолжение)

Рекомендация МСЭ-R	Описание	Разрешение координатной сетки	Требуемая пространственная интерполяция (см. Приложение 1)	Интерполяция по вероятности	Интерполяция переменной	Комментарии
P.835	Экспериментальные данные о вертикальных атмосферных профилях (Приложение 2)	353 места	Не требуется	Не применяется	Не применяется	См. веб-страницу с программным обеспечением для расчета ионосферного и тропосферного распространения, а также радиошума
	Данные о вертикальных атмосферных профилях для прогнозирования погоды (Приложение 3)	$1,5^\circ \times 1,5^\circ$	Не определена	Не применяется	Не применяется	См. веб-страницу с программным обеспечением для расчета ионосферного и тропосферного распространения, а также радиошума
P.836	Вероятность превышения общего объемного содержания водяных паров (%) (IWVC)	$1,125^\circ \times 1,125^\circ$	Билинейная ⁽¹⁾	Логарифмическая	Линейная	Используемые названия файлов указаны в соответствующем файле сведений Readme ⁽²⁾
	Вероятность превышения плотности водяных паров на поверхности (%) (Rho)	$1,125^\circ \times 1,125^\circ$	Билинейная ⁽¹⁾	Логарифмическая	Линейная	Используемые названия файлов указаны в соответствующем файле сведений Readme ⁽²⁾
	Приведенная высота водяных паров	$1,125^\circ \times 1,125^\circ$	Билинейная ⁽¹⁾	Логарифмическая	Линейная	Используемые названия файлов указаны в соответствующем файле сведений Readme ⁽²⁾
	Топографическая высота (над средним уровнем моря) (км)	$0,5^\circ \times 0,5^\circ$	Бикубическая	Не применяется	Не применяется	См. Рекомендацию
P.837	Среднемесячное общее количество дождевых осадков (мм) R0,01 (мм/ч)	$0,25^\circ \times 0,25^\circ$ $1,125^\circ \times 1,125^\circ$	Билинейная Билинейная	Не применяется Не применяется	Не применяется Не применяется	Используемые названия файлов указаны в соответствующем файле сведений Readme ⁽²⁾
	Преобразование статистических данных об интенсивности дождевых осадков с различными значениями времени интегрирования (Приложение 2)	Не применяется	Не требуется	Не применяется	Не применяется	Используемые названия файлов указаны в соответствующем файле сведений Readme ⁽²⁾
P.839	Среднегодовая высота изотермы 0 °C (км)	$1,5^\circ \times 1,5^\circ$	Билинейная	Не применяется	Не применяется	Используемые названия файлов указаны в соответствующем файле сведений Readme ⁽²⁾
P.840	Годовые и месячные статистические данные (среднее значение, стандартное отклонение и CCDF) совокупного объема жидкой воды в облаке Аппроксимация годового совокупного объема жидкой воды в облаке логарифмически нормальным распределением	$0,25^\circ \times 0,25^\circ$	Билинейная	Логарифмическая	Линейная	Используемые названия файлов указаны в соответствующем файле сведений Readme ⁽²⁾
P.1510	Среднемесячная и среднегодовая температура поверхности	$0,75^\circ \times 0,75^\circ$	Билинейная	Не применяется	Не применяется	Используемые названия файлов указаны в соответствующем файле сведений Readme ⁽²⁾

ТАБЛИЦА 2 (окончание)

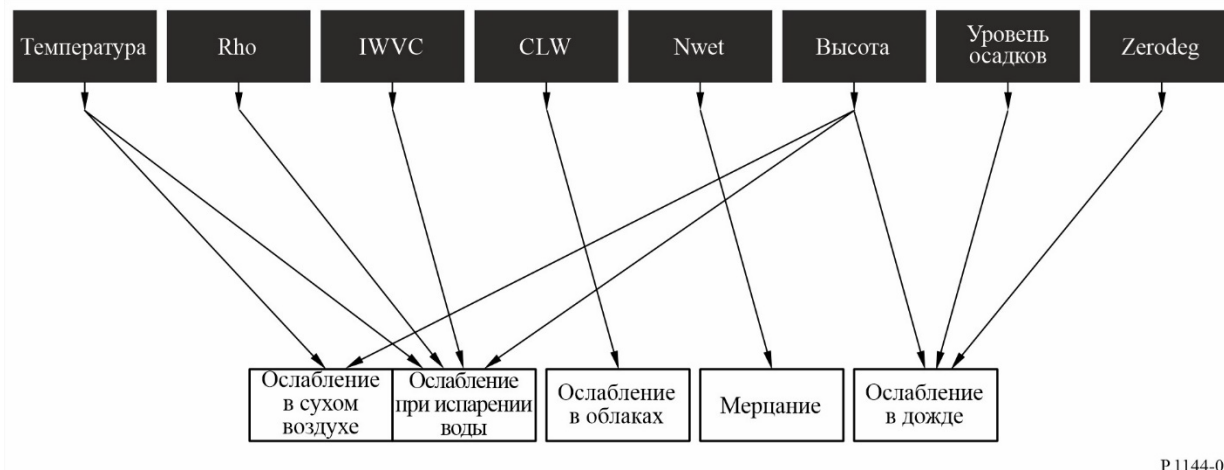
Рекомендация МСЭ-R	Описание	Разрешение координатной сетки	Требуемая пространственная интерполяция (см. Приложение 1)	Интерполяция по вероятности	Интерполяция переменной	Комментарии
P.1511	Топографическая высота (над средним уровнем моря) (км)	$0,08333^\circ \times 0,08333^\circ$	Бикубическая	Не применяется	Не применяется	В настоящей Рекомендации содержатся определения широты, долготы и высоты для Рекомендаций серии P. Используемые названия файлов указаны в соответствующем файле сведений <i>Readme</i> ⁽²⁾
	Гравитационная модель Земли версии 2008 г. (EGM2008) (м)	$0,08333^\circ \times 0,08333^\circ$	Бикубическая	Не применяется	Не применяется	Используемые названия файлов указаны в соответствующем файле сведений <i>Readme</i> ⁽²⁾
P.1812	Медианная годовая ΔN Медианная годовая N_0	$1,5^\circ \times 1,5^\circ$	Билинейная	Не применяется	Не применяется	Используемые названия файлов указаны в соответствующем файле сведений <i>Readme</i> ⁽²⁾
P.1853	Среднегодовое наземное давление Среднегодовая плотность водяного пара	$0,75^\circ \times 0,75^\circ$	Билинейная	Не применяется	Не применяется	WV_Annual.txt P_Annual.txt
P.2001	Преломление и градиент приземного уровня в нижнем 1 км атмосферы	Несколько	Билинейная	Не применяется	Линейная	Используемые названия файлов указаны в соответствующем файле сведений <i>Readme</i> ⁽²⁾
P.2001 и P.534	Критическая частота для спорадического слоя E (F0Es)	$1,5^\circ \times 1,5^\circ$	Билинейная	Линейная	Линейная	FoEs50.txt FoEs10.txt FoEs01.txt FoEs0.1.txt
P.2145	Годовые и месячные статистические данные (среднее значение, стандартное отклонение и CCDF) поверхностного давления Годовые и месячные статистические данные (среднее значение, стандартное отклонение и CCDF) приземной температуры Годовые и месячные статистические данные (среднее значение, стандартное отклонение и CCDF) поверхностной плотности водяных паров Годовые и месячные статистические данные (среднее значение, стандартное отклонение и CCDF) суммарного содержания водяного пара Аппроксимация годового суммарного содержания водяного пара распределением Вейбулла	$0,25^\circ \times 0,25^\circ$	Билинейная	Логарифмическая	Линейная	См. Рекомендацию
P.2148	Годовые статистические данные о скорости ветра на высоте 10 м над поверхностью Земли	$0,25^\circ \times 0,25^\circ$	Билинейная	Логарифмическая	Линейная	См. Рекомендацию

⁽¹⁾ Перед пространственной интерполяцией переменные в окружающих точках сетки приводятся к желаемой высоте в соответствии с процедурой масштабирования, изложенной в Рекомендации.

⁽²⁾ Файл *Readme* содержится в ZIP-файле (компоненты) на веб-странице, относящейся к этой Рекомендации.

Для справки: на рисунке 1 показаны взаимосвязи между геофизическими картами (черный цвет) и эффектом распространения (белый цвет).

РИСУНОК 1



P.1144-01

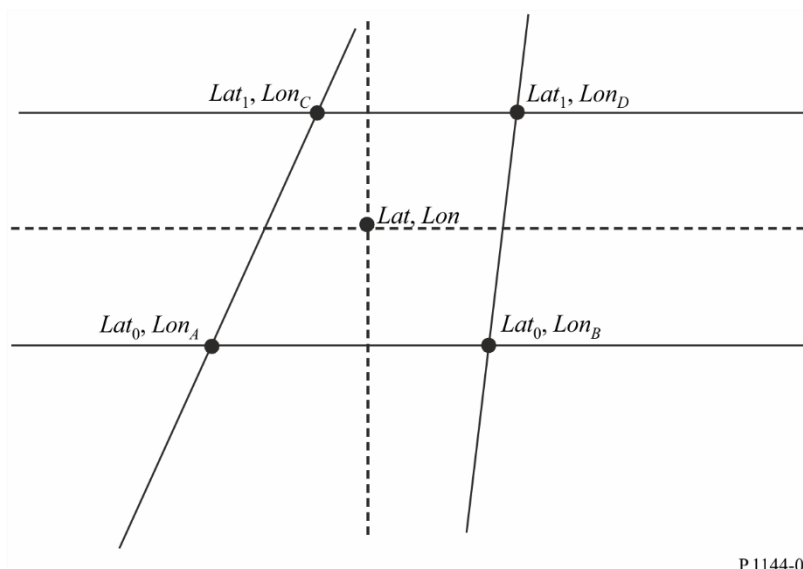
Приложение 1

1а Билинейная интерполяция на трапецидальной сетке

Дано: значения X в четырех окружающих точках: (Lat_1, Lon_C) , (Lat_1, Lon_D) , (Lat_0, Lon_A) и (Lat_0, Lon_B) ; то есть $X(Lat_1, Lon_C)$, $X(Lat_1, Lon_D)$, $X(Lat_0, Lon_A)$ и $X(Lat_0, Lon_B)$.

Задача: определить значение $X(Lat, Lon)$ в промежуточной точке (Lat, Lon) , используя билинейную интерполяцию.

РИСУНОК 2



P.1144-02

Решение: определить две вспомогательные переменные, t и s :

$$t = \frac{Lat - Lat_0}{Lat_1 - Lat_0}$$

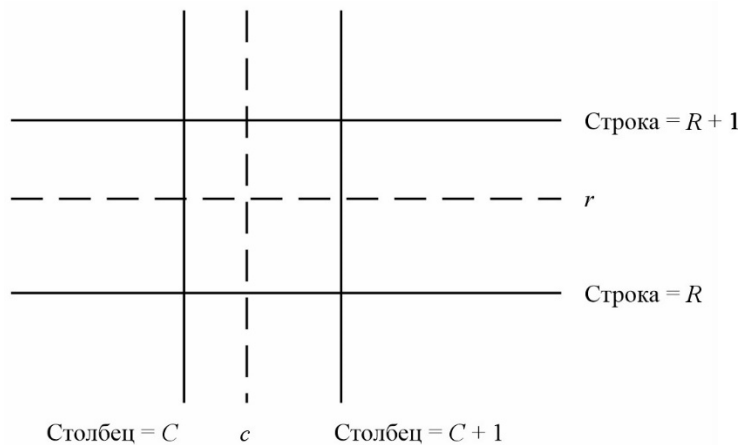
$$s = \frac{Lon - Lon_A + t (Lon_A - Lon_C)}{Lon_B - Lon_A + t (Lon_A - Lon_C + Lon_D - Lon_B)}$$

и рассчитать:

$$X(Lat, Lon) = (1 - s) (1 - t) X(Lat_0, Lon_A) + (1 - s) t X(Lat_1, Lon_C) + s (1 - t) X(Lat_0, Lon_B) + t s X(Lat_1, Lon_D).$$

1b Билинейная интерполяция на прямоугольной сетке

РИСУНОК 3



P.1144-03

Дано: значения I в четырех окружающих точках сетки: $I(R, C)$, $I(R, C + 1)$, $I(R + 1, C)$ и $I(R + 1, C + 1)$, где R , $R + 1$, C и $C + 1$ – это целые числа, обозначающие номера строки и столбца.

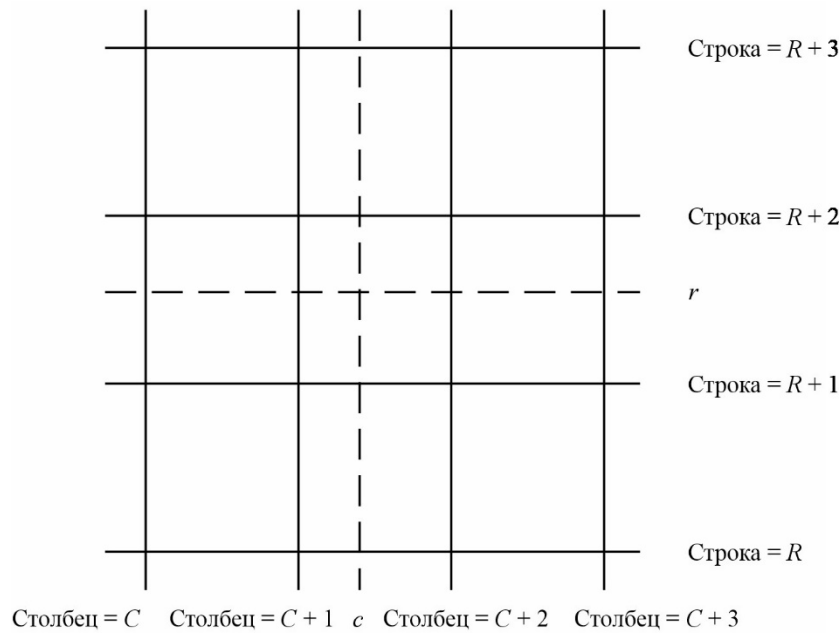
Задача: определить $I(r, c)$, где r является дробным числом, обозначающим номер строки между R и $R + 1$, а c – дробным числом, обозначающим номер столбца между C и $C + 1$, используя билинейную интерполяцию.

Решение: рассчитать:

$$I(r, c) = I(R, C) [(R + 1 - r)(C + 1 - c)] + I(R + 1, C) [(r - R)(C + 1 - c)] + I(R, C + 1) [(R + 1 - r)(c - C)] + I(R + 1, C + 1) [(r - R)(c - C)]$$

2 Бикубическая интерполяция

РИСУНОК 4



Р.1144-04

Дано: значения I в 16 окружающих точках сетки:

$$\begin{aligned}
 & I(R, C), I(R, C + 1), I(R, C + 2), I(R, C + 3), \\
 & I(R + 1, C), I(R + 1, C + 1), I(R + 1, C + 2), I(R + 1, C + 3), \\
 & I(R + 2, C), I(R + 2, C + 1), I(R + 2, C + 2), I(R + 2, C + 3), \\
 & I(R + 3, C), I(R + 3, C + 1), I(R + 3, C + 2), I(R + 3, C + 3)
 \end{aligned}$$

где $R, R + 1$ и т. д.; и $C, C + 1$ и т. д. – это целые числа.

Задача: рассчитать $I(r, c)$, где r является дробным числом, обозначающим номер строки между $R + 1$ и $R + 2$, а c – дробным числом, обозначающим номер столбца между $C + 1$ и $C + 2$, используя бикубическую интерполяцию.

Решение

Шаг 1. Для каждой строки X , где $X = \{R, R + 1, R + 2, R + 3\}$, рассчитать интерполяционное значение в желаемом дробном столбце c как:

$$RI(X, c) = \sum_{j=C}^{C+3} I(X, j) K(c - j),$$

где:

$$K(\delta) = \begin{cases} (a + 2)|\delta|^3 - (a + 3)|\delta|^2 + 1 & \text{при } 0 \leq |\delta| \leq 1 \\ a|\delta|^3 - 5a|\delta|^2 + 8a|\delta| - 4a & \text{при } 1 \leq |\delta| \leq 2 \\ 0 & \text{при } 2 \leq |\delta| \end{cases}$$

и

$$a = -0,5.$$

Шаг 2. Рассчитать $I(r,c)$, интерполируя одномерные интерполяции $RI(R,c)$, $RI(R+1,c)$, $RI(R+2,c)$ и $RI(R+3,c)$ таким же образом, как и интерполяции строк.

3 Интегрирование методом квадратуры Гаусса

Интегрирование методом квадратуры Гаусса – это точное приближение к определенному интегралу, если подынтегральная функция $f(x)$ хорошо аппроксимируется многочленом степени $2n-1$ или менее в области интегрирования. Значение n следует выбирать исходя из желательной точности приближения.

3.1 Обычный интеграл

Обычный интеграл может хорошо аппроксимироваться с помощью интегрирования методом квадратуры Гаусса, учитывая что:

$$\int_a^b f(x) dx = \int_{-1}^1 \left(\frac{b-a}{2}\right) f\left(\frac{a+b}{2} + \frac{b-a}{2}t\right) dt \\ \approx \sum_{i=1}^n W_i' f(X_i'),$$

где:

$$W_i' = \left(\frac{b-a}{2}\right) W_i; \\ X_i' = \frac{a+b}{2} + \frac{b-a}{2} X_i.$$

3.2 Двойной интеграл

Двойной интеграл возможно хорошо аппроксимировать с помощью интегрирования методом квадратуры Гаусса, учитывая что:

$$\int_a^b \int_c^d f(x,y) dx dy = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \left(\frac{b-a}{2}\right) \left(\frac{d-c}{2}\right) f\left(\frac{a+b}{2} + \frac{b-a}{2}s, \frac{c+d}{2} + \frac{d-c}{2}t\right) ds dt \\ \approx \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_i' Y_j' f(X_i', Z_j'),$$

где:

$$W_i' = \left(\frac{b-a}{2}\right) W_i; \\ X_i' = \frac{a+b}{2} + \frac{b-a}{2} X_i; \\ Y_j' = \left(\frac{d-c}{2}\right) W_j; \\ Z_j' = \frac{c+d}{2} + \frac{d-c}{2} X_j.$$

3.3 Алгоритм расчета точек (узлов) и весов квадратуры Гаусса

С помощью этого алгоритма рассчитываются точки (узлы), X_i , и веса, W_i , для $i = 1, 2, \dots, n$, где n – количество точек (узлов) квадратуры Гаусса. Переменная eps – это точность системы с плавающей запятой¹ машины. В машинах, поддерживающих арифметику с плавающей запятой IEEE, eps составляет примерно $2,2204e-16$ при двойной точности. Функция $floor(x)$ округляет x до ближайшего целого числа, меньшего или равного x .

Шаг 1: рассчитать $m = floor(\frac{n+1}{2})$.

Повторить шаги 2–13 для $i = 1 - m$.

Шаг 2: рассчитать $X_i = \cos\left(\frac{4i-1}{4n+2}\pi\right)$.

Шаг 3: рассчитать $Pm1 = 1$ и $P = X_i$.

Повторить шаги 4–5 для $j = 2 - n$.

Шаг 4: рассчитать $Pm2 = Pm1$ и $Pm1 = P$.

Шаг 5: рассчитать $P = \left(2 - \frac{1}{j}\right)X_i Pm1 - \left(1 - \frac{1}{j}\right)Pm2$.

Шаг 6: рассчитать $P' = \frac{n \cdot (X_i \cdot P - Pm1)}{X_i^2 - 1}$.

Шаг 7: рассчитать $\Delta = \frac{P}{P'}$.

Шаг 8: рассчитать $X_i = X_i - \Delta$.

Шаг 9: если $|\Delta| > eps$, переходить к шагу 3, иначе – переходить к шагу 10.

Шаг 10: рассчитать $Xlast = X_i + \Delta$.

Шаг 11: рассчитать $Pm1' = \frac{(n-1) \cdot Xlast \cdot Pm1 - Pm2}{(Xlast^2 - 1)}$.

Шаг 12: рассчитать $Pm1 = Pm1 - \Delta \cdot Pm1'$.

Шаг 13: рассчитать $W_i = \frac{2(1 - X_i^2)}{(n \cdot Pm1)^2}$.

Повторить шаг 14 для $i = m + 1 - n$.

Шаг 14: рассчитать $X_i = -X_{floor(\frac{n}{2}) + m + 1 - i}$ и $W_i = W_{floor(\frac{n}{2}) + m + 1 - i}$.

¹ Примеры значений X_i , точек квадратуры Гаусса, и W_i , весов квадратуры Гаусса, приведены в дополнительном продукте на веб-сайте цифровых продуктов 3-й Исследовательской комиссии МСЭ-R.