

*Тема № 3*

**Антенны и распространение радиоволн**

*Занятие № 2*

**Распространение радиоволн**

*Учебные вопросы*

- 1. Строение атмосферы**
- 2. Распространение поверхностных и пространственных радиоволн**
- 3. Помехи радиосвязи**

# 1. Строение атмосферы

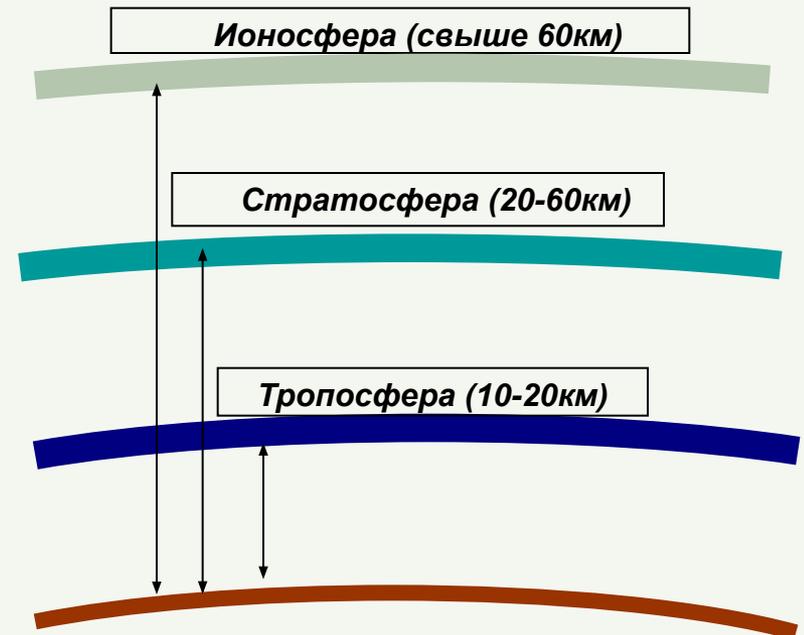
- Атмосферой называется газовая оболочка земли.
- Земная атмосфера, состоящая из воздуха и влаги, является основной средой, где распространяются радиоволны.
  - Состав атмосферы неоднороден.

## *Атмосфера делится на три части (слоя):*

- Верхний слой атмосферы на высотах свыше 60км называют **ионосферой**.

- Слой атмосферы на высотах 20-60км называют **стратосферой**.

- Нижнюю часть атмосферы до высот 10-20км называют **тропосферой**.



## Атмосфера характеризуется такими характеристиками, как:

- **состав**
- **распределение температуры по высоте**
- **плотность (число молекул в единице объема).**

Вплоть до высоты порядка 60 км восходящие и нисходящие потоки воздуха настолько хорошо перемешивают атмосферу, что обеспечивают, постоянство ее состава.

Тропосфера имеет наибольшую плотность, газы в ней равномерно распределены, воздух является хорошим диэлектриком. В ней сосредоточена почти вся влага атмосферы, что оказывает значительное влияние на распространение сантиметровых СВВ и миллиметровых ММВ волн (кислород интенсивно поглощает излучение с  $\lambda \approx 0,5\text{см}$ , водяной пар с  $\lambda \approx 1,35\text{см}$ ). Для более длинных волн (больше 10см) тропосфера практически прозрачна.

На высотах более 60км различие в массах составляющих атмосферу газов приводит к ее расслоению: в верхних слоях атмосферы воздух сильно разрежен и газы, входящие в состав атмосферы, располагаются слоями – более лёгкие над более тяжёлыми. **Таким образом, атмосфера в своей верхней части разрежена, имеет слоистое строение и неоднородна по составу.**

***Температура атмосферы*** также изменяется с изменением высоты.

От земли и до верхней границы тропосферы температура убывает на 5-6° на каждый километр, так как здесь нагревание воздуха происходит за счет нагретой Солнцем Земли.

Начиная с высот 25км и вплоть до высоты 50-60км, температура растет. Это объясняется тем, что в этой области имеется значительное количество озона, который интенсивно поглощает ультрафиолетовое излучение Солнца, что приводит к повышению температуры газа.

Затем температура понижается вплоть до высот порядка 80км и после второго минимума температура плавно растет, достигая значений 2000-3000°К на высотах 500-600км. Здесь температура растет за счет непосредственного прогревания лучами Солнца.

В разряженной атмосфере под воздействием солнечной радиации и космических лучей молекулы кислорода и азота расщепляются на атомы. Кроме того, начиная с высот 60км, возникает ионизация: часть атомов распадается на свободные электроны и ионы.

***Количество свободных электронов в единице объема принято характеризовать электронной плотностью.***

Электронная плотность атмосферы также изменяется с высотой. Так, на высотах до 60 км электронов в атмосфере столь мало, что ими обычно пренебрегают, хотя молекул и атомов газа здесь достаточно. Это объясняется тем, что энергии Солнца недостаточно для ионизации.

На высотах свыше 400км электронная плотность также мала, так как мало атомов и молекул газа (нечему ионизироваться), хотя энергия Солнца достаточна для ионизации.

**Содержание заряженных частиц в атмосфере определяется двумя процессами: ионизацией внешним излучением и рекомбинацией из-за соударений.**

У поверхности земли ионизированных атомов и молекул почти нет, т. к. поток ионизирующего излучения очень мал из-за поглощения верхними слоями, а рекомбинация происходит немедленно. В верхних слоях поток ионизирующего излучения велик, а столкновения, приводящие к рекомбинации, относительно редки, поэтому практически все атомы в верхних слоях ионосферы ионизированы.

**На высоте порядка 300-400км имеется основной механизм ионизации, выше и ниже которого электронная плотность убывает.**

Область ионосферы ниже основного максимума называют **внутренней**, а выше максимума **внешней** ионосферой.

Наиболее изученной является внутренняя ионосфера. Здесь существует несколько неярко выраженных **максимумов электронной плотности ионосферы**, которые называют **ионосферными слоями** и обозначают символами **D, E, F (F1, F2)**.

Ионизированные слои воздуха оказывают сильное влияние на распространение радиоволн.

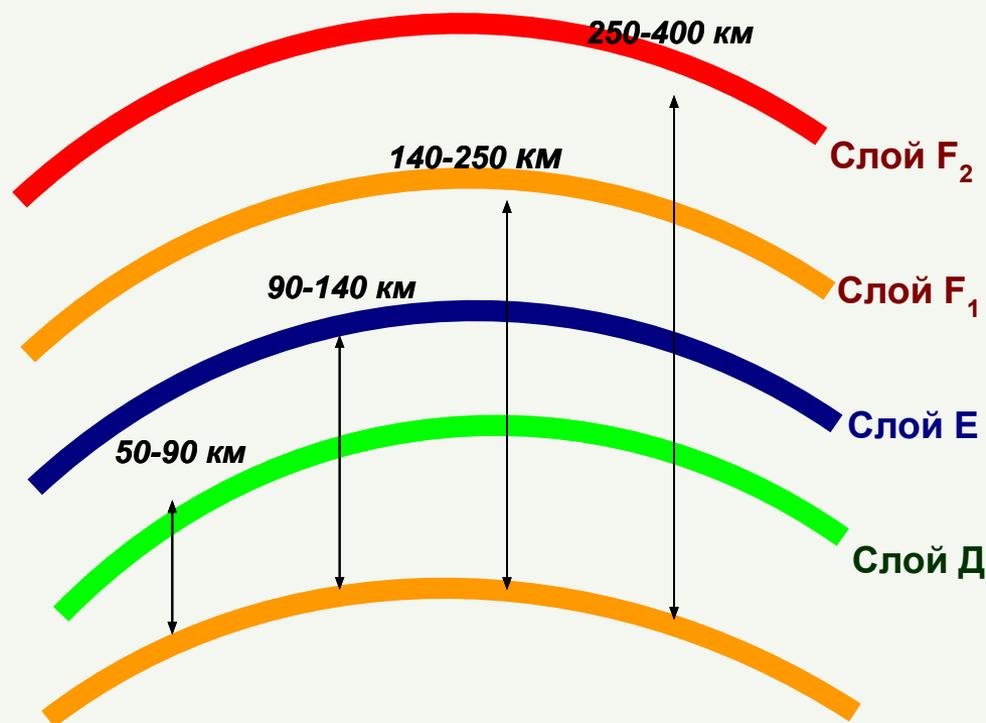
Ближе всего к поверхности земли на **высоте около 60-90км** расположен **слой D**. Это нерегулярное образование ионосферы существует только в дневные часы, когда велика интенсивность солнечного ионизирующего излучения.

Этот слой почти не способен отражать радиоволны, он их только поглощает, и тем сильнее, чем длиннее волна.

На высотах 90-140км постоянно существует **слой E**.

Ночью слой располагается несколько выше, а днем – ниже, что связано с изменениями потока ионизирующего излучения.

От слоя E хорошо отражаются длинные и средние волны, а короткие в нем сильно поглощаются.



Самый верхний слой, **слой F**, располагается на высотах около **140-400км**. В летнее время (май-октябрь) днем он расщепляется на слои F1 и F2. **Слой F1** расположен на высотах **140-250км** и обусловлен ионизацией молекулярного азота, а **слой F2 (250-400км)** обусловлен ионизацией атмосферного кислорода.

Ночью слой F1 исчезает вследствие рекомбинации, а слой F2 сохраняется, хотя концентрация электронов в нем уменьшается.

**Слой F2 является основным отражающим слоем для коротких волн.**

### ***ВЫВОД:***

- Солнечные лучи, попадая в верхние слои атмосферы, создают незначительную ионизацию, т.к. газ очень разряжен.
- По мере проникновения лучей в более плотные слои атмосферы степень ионизации увеличивается. С приближением к земле энергия солнечных лучей падает и степень ионизации опять уменьшается.
- Т.о., ионосфера состоит из нескольких ионизированных слоев, плавно переходящих один в другой. Число ионизированных слоёв, их высота над землёй и степень ионизации зависят от времени суток и времени года, географической широты, плотности атмосферы, солнечной активности.

## 2. Распространение радиоволн

В зависимости от того, каким путем или по какой траектории радиоволны распространяются от передатчика к приемнику, различают радиолинии, работающие земными (поверхностными) и ионосферными (пространственными) волнами.

### Распространение пространственных радиоволн

Излученные под углом к земной поверхности пространственные волны достигают ионосферы и, отражаясь от нее, возвращаются на землю на больших расстояниях от места излучения. При этом часть энергии волны поглощается ионосферой.

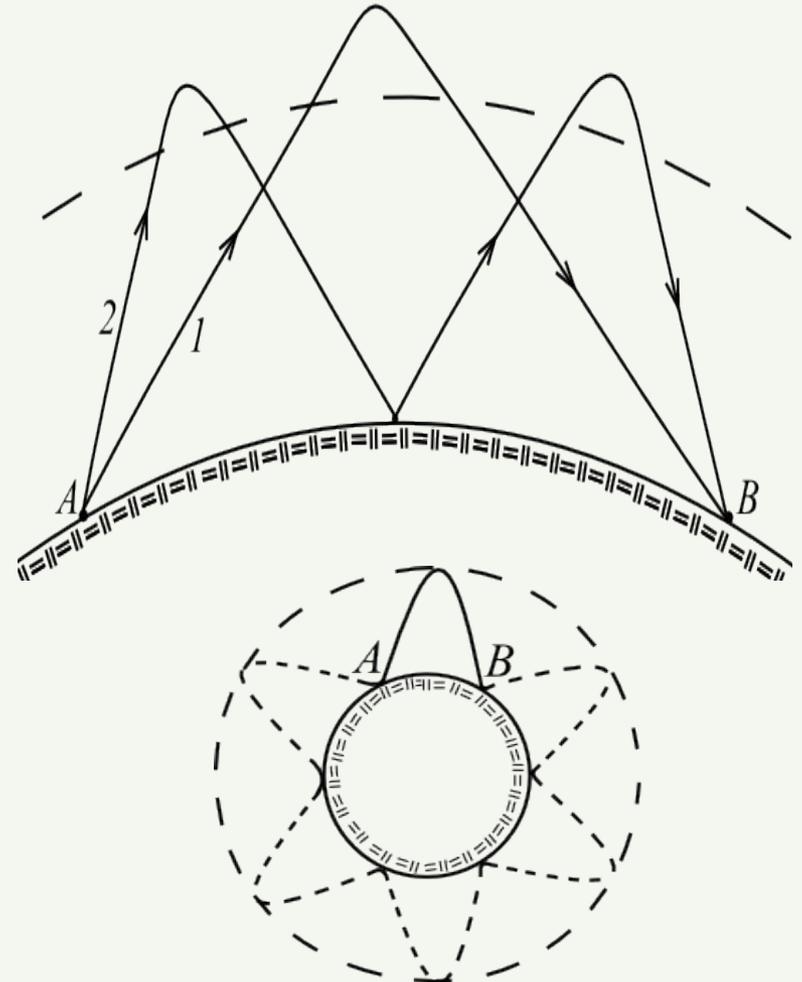


Скорость РРВ в ионосфере уменьшается по мере проникновения их из электрически менее плотной области в электрически более плотную. Это приводит к изменению направления РРВ и ее возвращению на поверхность земли.

Самый простой путь распространения радиоволн, отраженных от ионосферы — **односкачковый**. Дальность связи при этом достигает 4000 км.

Более сложный путь — **многоскачковый**, когда волна несколько раз переотражается ионосферой и землей, преодолевая при этом ослабление.

Время запаздывания «кругосветного эха» составляет около 0,14 с. Полагают, что число отражения волны от ионосферы достигает около 12-14.



Угол  $\theta$ , образованный лучом волн и касательной к поверхности Земли в пункте излучения, называется углом возвышения.

При крутом падении  $\theta=90^\circ$  волны проходят сквозь ионосферу в космос.

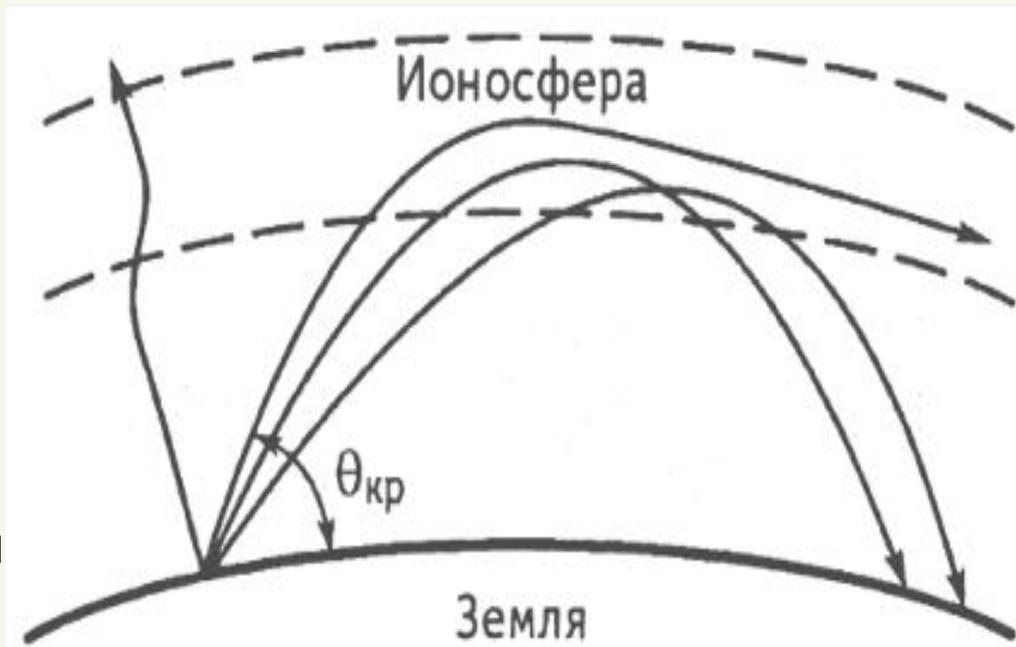
При некотором угле  $\theta_{кр}$  (критический угол зависит от степени ионизации слоя и частоты) происходит полное внутреннее отражение и луч распространяется в ионосфере параллельно земной поверхности.

**Минимальный угол  $\theta_{min}$ , при котором в данных условиях еще возможно отражение радиоволны, называется критическим углом.**

При углах, меньших критического, лучи возвращаются к Земле, и тем дальше от пункта излучения, чем меньше угол  $\theta$ .

При излучении по касательной к Земле достигается наибольшая дальность скачка, составляющая приблизительно 4000 км.

Необходимая дальность связи определяет тот угол  $\theta$ , под которым антенна должна излучать максимум энергии.



Максимальная частота излучения, при которой волна, падающая вертикально на ионосферный слой, отразится от него и вернется на землю называется **критической частотой  $f_{крит}$** .

Частоты выше критической данным слоем не отражаются.

Минимальное расстояние между передатчиком и приемником (при заданных частотах сигнала и плотности ионизации), при котором имеет место отражение, называют **расстоянием скачка или критическим расстоянием**.

Радиолуч, посланный наклонно, отражается ионосферой лучше. Касательные к горизонту лучи обеспечивают наибольшую дальность связи.

Частота колебаний касательного луча, еще отражающегося от ионосферы, называется **максимально применимой частотой (МПЧ)**. Она выше  $f_{крит}$  в 3-5 раз.

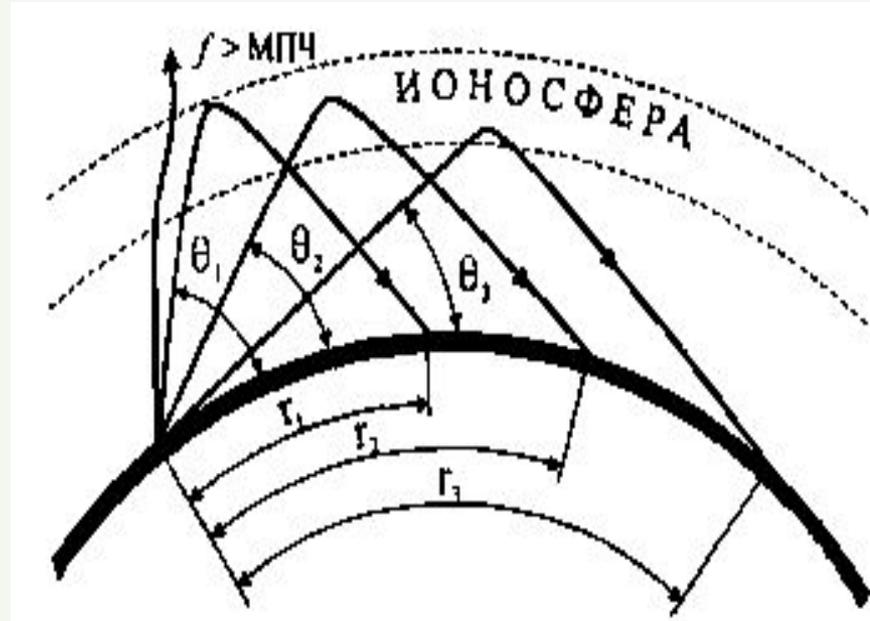
Волны с частотами выше МПЧ, посланные с поверхности земли, уже ни при каких условиях не могут вернуться обратно на землю – недостаточно преломляясь в ионосфере, они уходят в космос.

МПЧ можно рассчитать, зная  $f_{\text{крит}}$  и высоту слоя.

Однако это не значит, что на частотах, меньше МПЧ, возможна сверхдальняя связь, т.к. с понижением частоты возрастает поглощение радиоволн в ионосфере.

Поэтому ниже наинизшей применимой частоты (НПЧ) выбор частот не рекомендуется.

Оптимальная рабочая частота (ОРЧ) для данной трассы, на которой гарантирована надежная связь, лежит между МПЧ и НПЧ.



# Распространение поверхностных радиоволн

- Поверхностная волна испытывает большое *затухание*, вследствие чего она распространяется на ограниченные, сравнительно небольшие расстояния.
- Напряженность поля поверхностной волны слабо зависит от времени суток, года, метеорологических и космических явлений.
- При этом значительное влияние на величину напряженности ЭМ поля в точке приема оказывают изменение параметров почвы, а также рельефа местности и растительный покров на трассе.

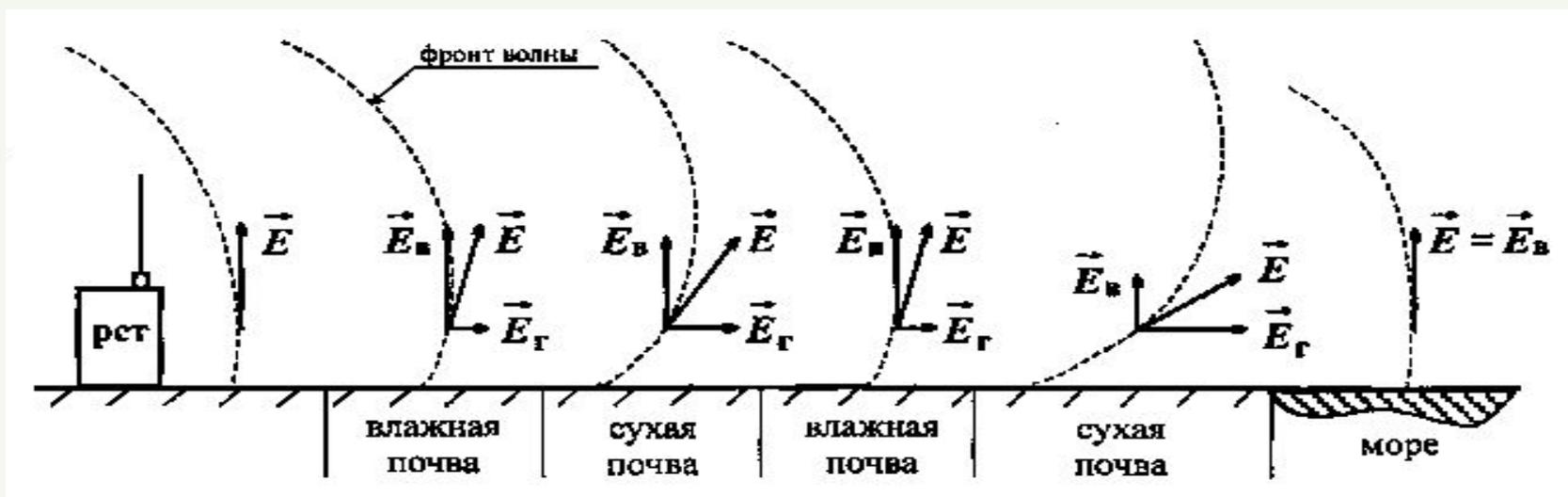
**Параметры почвы – диэлектрическая проницаемость и электрическая проводимость** колеблются в широких пределах – от диэлектрика (лед, сухой песок) до хорошего проводника (морская вода, влажная почва).

Это объясняется тем, что благодаря наличию в почве солей проводимость ее меняется в зависимости от влажности.

При распространении радиоволн вдоль электрически неоднородной поверхности, когда различные участки трассы имеют разные параметры, главную роль в ослаблении ЭМ поля играют концевые участки трассы с расположенными на них радиостанциями. Поэтому для обеспечения максимальной дальности связи предпочтительно разворачивать радиостанции над влажной почвой.

Обычно на радиолинии земные волны распространяются над участками с различными проводимостями. При этом фронт волны вследствие разных фазовых скоростей в воздухе и над землей искривляется, что приводит к наклону вектора электрического поля относительно поверхности земли.

# Характер изменения вектора $E$ при распространении волны над участками с различной проводимостью.



Над участками с хорошей проводимостью (влажная почва, солончаки) преобладает вертикальная составляющая  $E_v$  вектора электрического поля, а над участками с малой проводимостью вектор  $E$  наклоняется и будет иметь существенную горизонтальную составляющую  $E_r$ .

Отсюда следуют важные практические выводы:

- 1) над влажными и хорошо проводящими почвами необходимо работать только на вертикальные антенны;
- 2) над сухими почвами можно применять как вертикальные, так и горизонтальные антенны.

***Чтобы правильно выбрать антенну, место ее развертывания и грамотно производить маневр частотами, необходимо учитывать следующие особенности.***

1. Вертикально поляризованные волны ослабляются земной поверхностью меньше, чем горизонтально поляризованные. По этой причине для связи на мобильных радиостанциях чаще используются вертикальные штыревые антенны.

2. Ослабление радиоволн зависит от частоты сигнала, а именно: чем выше рабочая частота, тем сильнее поглощаются радиоволны и, следовательно, меньше дальность связи. Поэтому на УКВ радиостанциях дальность связи всегда меньше, чем на КВ радиостанциях при одной и той же мощности передатчиков и чувствительности приемников.

3. Чем выше проводимость почвы, тем меньше потерь и тем большую дальность связи можно обеспечить. Так, например, над морем, где проводимость гораздо выше по сравнению с почвой, дальность связи в 7 - 8 раз больше.

Наличие леса в пункте приема дополнительно поглощает энергию радиоволн и приводит к колебанию величины напряженности поля, так как в точку приема приходит не только волна, распространяющаяся по линии трассы, но и волны, отраженные от деревьев (явление интерференции).

Интерференционный характер особенно выражен при расположении радиостанций в редком лесу, на полянах и на опушках. При размещении радиостанций непосредственно в лесу поглощающее действие лесного массива сказывается таким же образом, как и при работе над ровной поверхностью земли с параметрами, соответствующими сухой почве.

Дальность действия радиостанций в лесу даже при правильном их размещении сокращается в 2-3 раза по сравнению с открытыми трассами. Поглощение радиоволн в лесу (а, следовательно, и сокращение дальности связи) зависит от его влажности. Так, дальность связи при расположении радиостанций во влажном лесу (например, во время длительных дождей) сокращается в 2 раза по сравнению с дальностью связи при их расположении в сухом лесу.

При работе на штыревую антенну следует избегать расположения радиостанций непосредственно у стволов деревьев с густой и низко расположенной кроной во избежание экранирования волны (особенно в дождливую погоду).

Различного рода препятствия на трассе (неровности земной поверхности, строения и т. д.), закрывающие прямую видимость между работающими радиостанциями, вызывают дополнительное затухание радиоволн; однако, при правильном выборе мест развертывания радиостанций связь и в этих случаях может быть устойчивой. Это происходит благодаря *дифракции* радиоволн, под которой понимают способность радиоволн огибать встречающихся на пути их распространения препятствия, что зависит главным образом от длины волны и размеров препятствий. Чем короче радиоволна, тем меньше выражена ее способность огибать препятствия, и тем больше радиоволна отражается и поглощается.

Препятствия, находящиеся на расстоянии в 3-5 раз большем, чем их высота, оказывают значительно меньше влияния на дальность и надежность радиосвязи. Поэтому всегда следует стремиться располагать радиостанцию дальше от препятствия, чтобы обеспечить лучшую видимость на ее вершину.

$$S_{\text{пр}} = (3-5) \lambda$$

### 3. Помехи радиосвязи

Все помехи, создаваемые любому приемному устройству можно подразделить на два больших класса - ***внутренние и внешние***.

***Внутренние помехи*** присущи самой приемной аппаратуре.

***Внешние помехи*** издаются внешними источниками и воздействуют на антенну приемного устройства.

Внешние помехи подразделяются на ***преднамеренные***, которые создаются противником для забития работы радиоэлектронных средств и ***непреднамеренные***, к которым относятся промышленные, атмосферные, космические и помехи от других работающих радиосредств или так называемые взаимные помехи.

**Промышленные помехи**, создаются различного рода электрическими установками, работа которых сопровождается искрением (электромоторы, генераторы, трамвай, троллейбус, зажигание автомобилей, электросварка и т.п.). Эти помехи особенно существенны в крупных промышленных пунктах, где их уровень достигает  $100 \text{ мкВ/м}$  в диапазоне волн  $2000\text{-}10000 \text{ м}$  (ДВ). На более коротких волнах уровень промышленных помех уменьшается, так для диапазона дециметровых и коротковолнового участка метровых волн они не оказывают влияния, т.е. не ощущаются. Промышленные помехи обычно стремятся подавить в месте их возникновения путем применения фильтрации и экранировки источников помех. Эффективной мерой борьбы с ними является удаление приемных центров от крупных промышленных объектов;

**Атмосферные помехи.** Источниками атмосферных помех являются грозы, причем в основном грозы, происходящие в течение круглого года в экваториальных районах земного шара. **Во время грозового разряда возникает мощный импульс. Такой импульс создает непрерывный спектр частот,** причем амплитуда синусоидальных составляющих спектра убывает обратно пропорционально частоте. Наибольшего значения амплитуда достигает на частотах около 10 кГц. Практическое влияние атмосферные помехи оказывают на все диапазоны волн, однако на диапазоны дециметровых, сантиметровых и миллиметровых волн эти помехи сказываются только от местных гроз и их уровень очень незначителен. Интенсивность атмосферных помех с увеличением географической широты уменьшается, т.е. в полярных районах земного шара их значительно меньше. Однако в северных районах создаются атмосферные помехи, обусловленные частицами снега и льда, которые во время вьюги и буранов несутся с большими скоростями, электризуются и создают искрение. Уровень этих помех невысок и пропорционален силе ветра, но они проявляются в широком спектре частот, в том числе и в диапазоне сантиметровых волн.

***Космические помехи.*** Радиоизлучения, создаваемые внеземными источниками, называют космическими, а создаваемые этими излучениями помехи - космическими. Основным источником радиоизлучения является Галактика, создающая фон радиоизлучения, на который накладывается излучение многих дискретных источников. Мощными дискретными источниками радиоизлучения является Солнце, Юпитер, Сатурн, Венера, Луна, звезды, туманности Кассиопея, Лебедь и др. Излучение Галактики измерялось в диапазоне от средних до миллиметровых волн, на основании чего были построены карты распределения по небесной сфере. С повышением частоты помехи Галактики уменьшаются; определяющими они являются в диапазоне 18-30 МГц (коротковолновой диапазон). Земля также является источником радиоизлучения и это излучение может быть принято некоторыми типами антенн на Земле или антеннами космических кораблей при связи с Землей.