

Методы зондирования окружающей среды



Дальности обнаружения метеорологических объектов

Профессор Кузнецов Анатолий Дмитриевич

Российский государственный
гидрометеорологический университет

**При
радиозондирования
рассматриваются
дальности:**

**проведении
атмосферы
следующие**

**- предельная
радиовидимости;**

дальность

**- максимальная
обнаружения.**

дальность

**Определение
предельной дальности
радиовидимости
при отсутствии рефракции**

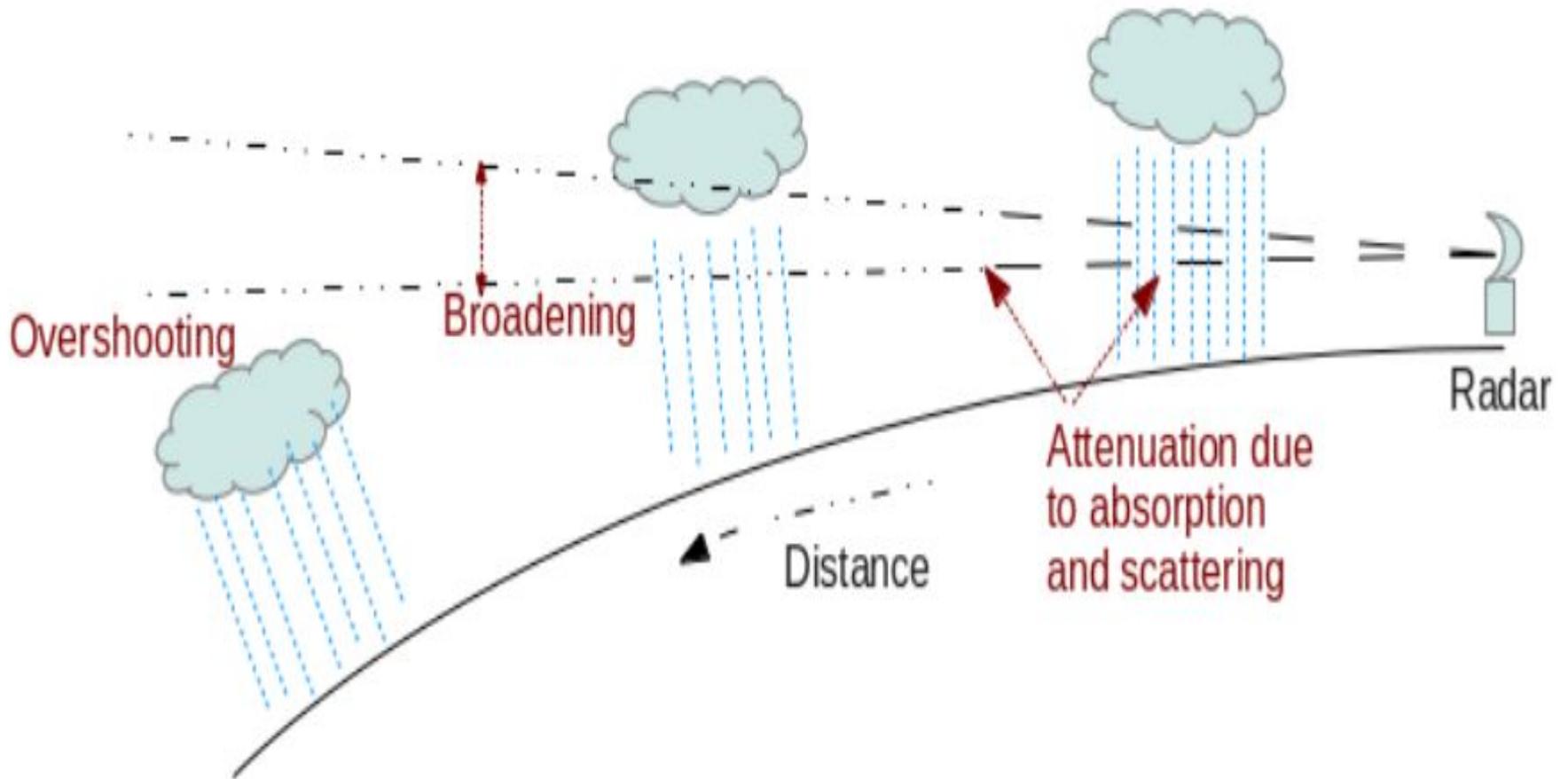
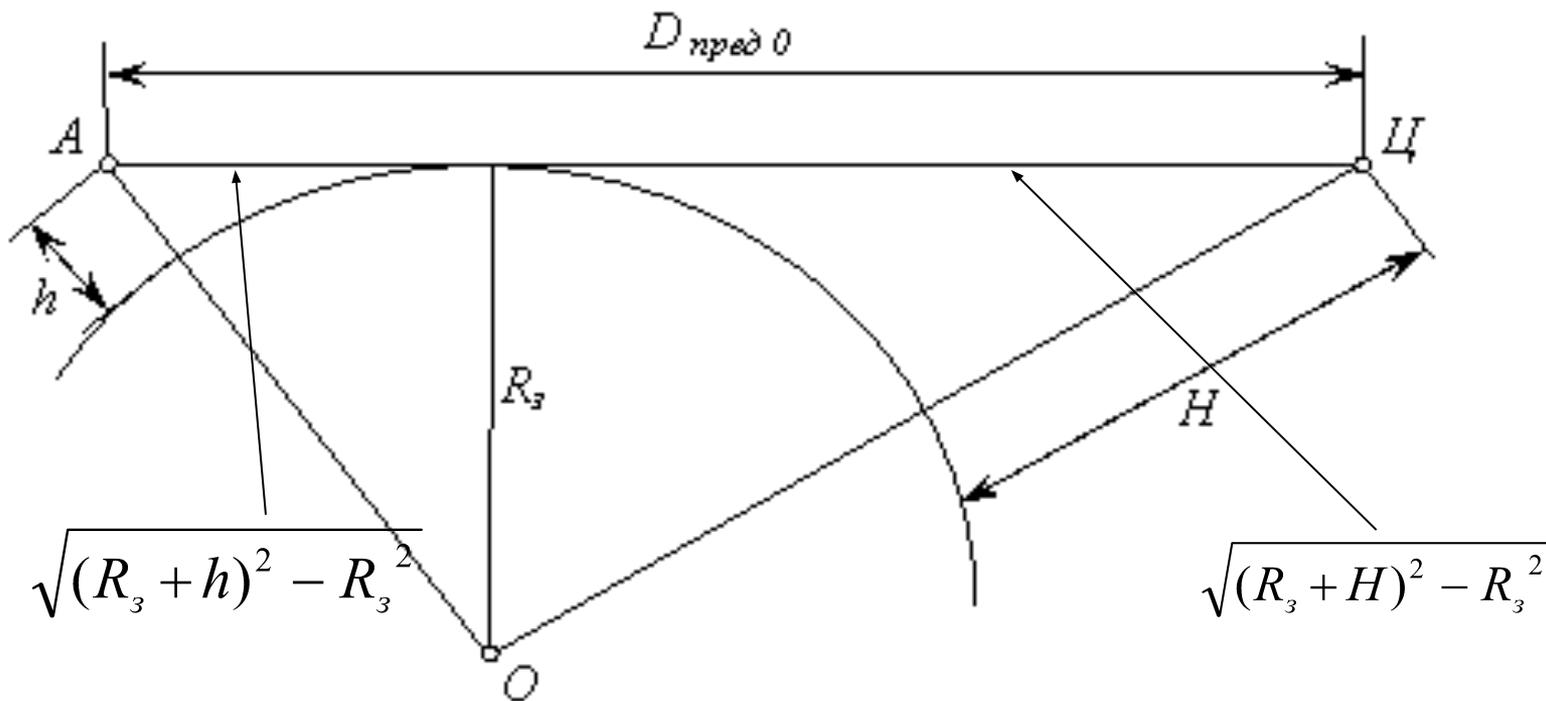


Схема радиолокационного зондирования
(при отсутствии рефракции)

При прямолинейном распространении радиоволн (без учета рефракции) предельная дальность радиолокационного обнаружения цели, называемая также «предельной дальностью прямой видимости», будет равна

$$R_{пред} = \sqrt{(R_3 + h)^2 - R_3^2} + \sqrt{(R_3 + H)^2 - R_3^2}$$

где $R_3 = 6370$ км – радиус Земли.



Или

$$R_{пред} = \sqrt{R_3^2 + 2hR_3 + h^2 - R_3^2} + \sqrt{R_3^2 + 2HR_3 + H^2 - R_3^2}$$

Так как при расчете предельного значения $R_{пред}$ выполняются следующие неравенства:

$$2R_3 \gg h \quad \text{или} \quad 2R_3 h \gg h^2$$

и

$$2R_3 \gg H \quad \text{или} \quad 2R_3 H^2 \gg H^2,$$

то при определении $R_{пред}$ можно воспользоваться следующим приближенным выражением (все параметры указываются в км):

$$R_{пред} \approx \sqrt{2R_3} (\sqrt{h} + \sqrt{H}) [\text{км}]$$

или при задании высот в метрах:

$$R_{пред} \approx 3.57 (\sqrt{h[\text{м}]} + \sqrt{H[\text{м}]}) [\text{км}]$$

При высоте антенны МРЛ $h = 50 \text{ м} = 0.05 \text{ км}$ и высоте объекта радиолокационного обнаружения $H = 5 \text{ км}$ предельная дальность обнаружения $R_{\text{пред}} \approx 278 \text{ км}$.

При высоте антенны МРЛ $h = 50 \text{ м}$ $H = 0.05 \text{ км}$ и высоте объекта радиолокационного обнаружения $H = 1 \text{ км}$ предельная дальность обнаружения $R_{\text{пред}} \approx 138 \text{ км}$.

При отсутствии экранирующих предметов (в голой степи) два человека ($H = h = 1.8 \cdot 10^{-3} \text{ км}$) смогут «видеть» друг друга на предельном расстоянии $R_{\text{пред}} \approx 3.1 \text{ км}$.

**Определение
предельной дальности
радиовидимости
при наличии рефракции**

(с использованием
метода эквивалентного радиуса Земли)

При наличии рефракции для ее учета могут быть использованы различные подходы и, в том числе, рассмотренный ранее **метод эквивалентного радиуса Земли**, который позволяет свести задачу криволинейного распространения радиоволн к задаче с прямолинейным распространением.

Для этого криволинейную траекторию луча как бы “разгибают”, изменяя радиус Земли до тех пор, пока траектория луча не станет прямолинейной.

Полученный таким образом радиус сферы и называют **эквивалентным радиусом Земли $R_э$** .

При рассмотрении методов учета рефракции в задачах распространения радиоволн применение метода **эквивалентного радиуса Земли** $R_э$ позволило получить следующее уравнение

$$\sin \varphi_0 = \left[1 + H \left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{n_0} \frac{dn}{dh} \right) \right] \sin \varphi$$

которое, по определению метода, нужно рассматривать как уравнение прямолинейного распространения радиолуча около сферы, радиус которой $R_э$ при наличии рефракции определяется как

$$\frac{1}{R_э} = \frac{1}{R_3} + \frac{1}{n_0} \frac{dn}{dh}$$

где n_0 – значение коэффициента преломления на уровне земной поверхности, R_3 – радиус Земли, dn/dh – постоянный градиент коэффициента преломления в тропосфере.

Введенное понятие эквивалентного радиуса позволяет, в частности, определить **дальность радиовидимости** $R_{пр}$, т.е. такое расстояние до объекта, при котором еще возможно его «визуальное» обнаружение (объект не находится в зоне радиотени).

Для нулевых углов возвышения антенны $R_{пр}$ при наличии рефракции определяется следующим выражением

$$R_{пр} = \sqrt{2R_э} \left(\sqrt{H} + \sqrt{h} \right),$$

где h – высота антенны радиолокатора над поверхностью, H – высота объекта над поверхностью.

В условиях нормальной рефракции, когда

$$dn/dh = - 4 \cdot 10^{-8} \text{ м}^{-1}$$

$$R_{\text{э}} \approx 25000 \text{ км}$$

и

$$R_{np} (\text{км}) = 4.1 \left(\sqrt{H(\text{м})} + \sqrt{h^*(\text{м})} \right).$$

**Определение
максимальной дальности
обнаружения
метеорологических объектов**

Ранее было показано, как можно определить потенциальную дальность обнаружения объекта (дальность радиовидимости $R_{пр}$) с учетом следующих факторов:

- сферичности Земли;
- радиорефракции.

При этом, если метеорологический объект находится на расстоянии большим, чем $R_{пр}$, то это означает, что он находится в зоне радиотени и принципиально не может быть обнаружен и исследован радиолокационными методами.

Напомним, что значение $R_{пр}$ зависит от высот антенны МРЛ и метеорологического объекта и вертикального профиля коэффициента преломления в тропосфере.

Для определения другой важной характеристики, также определяющей возможность исследования метеорологических объектов радиолокационными средствами - **максимальной дальности обнаружения метеорологических объектов**, необходимо обратиться к рассмотрению полученного ранее основного уравнения радиолокации:

$$\frac{P_{\Pi}}{P_{ш}} = \Pi_{\text{рл}} \frac{Z_a}{R^2}$$

Здесь

P_{Π} – поток излучения, сформированного импульсным отражающим объемом, находящимся на расстоянии R от РЛС,
 $P_{ш}$ – мощность собственных шумов приемника радиолокатора,
 $\Pi_{\text{рл}}$ – метеорологический потенциал МРЛ,
 Z_a – радиолокационная отражаемость.

Прологарифмируем **основное уравнение радиолокации метеорологических целей** и умножим левую и правую части полученного выражения на 10. Тогда рабочий вид **основного уравнения радиолокации метеорологических целей** можно записать следующим образом:

$$\left(\frac{P_n}{P_{ш}} \right)' = \Pi'_{РЛ} + 10 \lg Z_a - 20 \lg R$$

где

$$\left(\frac{P_n}{P_{ш}} \right)' = 10 \lg \frac{P_n}{P_{ш}} \quad \Pi'_{РЛ} = 10 \lg \Pi_{РЛ}$$

Размерности двух последних величин (с апострофами) – децибеллы (дБ).

Теоретический анализ возможностей исследования рабочего вида основного уравнения радиолокации метеорологических целей предполагает использование следующих характеристик:

- максимального радиуса действия МРЛ: R_{\max} ;
- минимального метеорологического потенциала МРЛ: $\Pi'_{PL \min}$;
- минимальной радиолокационной отражаемости на заданном расстоянии: $\lg Z_{a \min}$

Для нахождения формул для расчета этих характеристик необходимо ввести **коэффициент различимости** $k_{\text{разл}}$, определяющего возможность надежного определения отраженного от метеорологических объектов сигнала на уровне собственных шумов приемника МРЛ.

Величина коэффициента различимости $k_{\text{разл}}$ определяется следующим выражением:

$$k_{\text{разл}} = \left(\frac{P_n}{P_{\text{ш}}} \right)_{\min}$$

где в правой части уравнения стоит минимальная величина отношения сигнала к величине шума, различимая МРЛ (например, для МРЛ-2 эта величина принималась равной 2 дБ, т.е. $P_n \geq 1.6 P_{\text{ш}}$).

В дальнейшем, при определении введенных выше характеристик, всегда в рабочем виде основного уравнения радиолокации метеорологических целей величина отношения сигнал-шум будет заменяться значением $k_{\text{разл}}$.

Максимальный радиус действия МРЛ

Заменяем правую часть основного уравнения радиолокации (в рабочем виде) на величину $k_{\text{разл}}$ и затем решим его относительно $\lg R$. В результате получим выражение, определяющее **максимальный радиус действия МРЛ**:

$$\lg R_{\text{max}} = \frac{1}{20} (\Pi'_{\text{РЛ}} + 10 \lg Z_a - k_{\text{разл}})$$

Определение максимального радиуса R_{max} :
максимальным радиусом действия МРЛ называется такое расстояние, при котором радиолокатор, обладающий потенциалом $\Pi'_{PL\min}$, может уверенно обнаружить метеорологический объект, обладающей радиолокационной отражаемостью Z_a и находящийся в зоне радиовидимости, т.е на расстоянии, меньшим или равным $R_{пр}$.

Минимальный метеорологический потенциал МРЛ

Для определения минимального метеорологического потенциала МРЛ необходимо рассмотреть случай, когда выполняется следующее равенство:

$$R_{\max} = R_{\text{пр}}$$

Тогда, заменив в основном уравнении радиолокации (в рабочем виде) R на $R_{\text{пр}}$ и разрешив полученное уравнение относительно метеорологического потенциала МРЛ, получаем искомое уравнение для расчета **минимального потенциала МРЛ:**

$$P'_{\text{РЛ min}} = 20 * \lg R_{\text{пр}} - 10 * \lg Z_a + k_{\text{разл}}$$

Определение: минимальным потенциалом МРЛ называется такой потенциал, при котором метеорологический объект, обладающий радиолокационной отражаемостью Z_a и находящийся на предельном расстоянии $R_{пр}$, может быть уверенно обнаружен МРЛ.

Минимальный потенциал МРЛ существенно зависит от величины радиолокационной отражаемости Z_a , т.е. от типа метеорологического объекта (туман или конвективное облако).

Минимальная
радиолокационная отражаемость
на заданном расстоянии

Определим значение **минимальной радиолокационной отражаемости** $Z_{a \min}$, при которой метеорологический объект, находящийся на предельном расстоянии может быть обнаружен МРЛ с заданным метеорологическим потенциалом (например, серийно выпускаемой МРЛ).

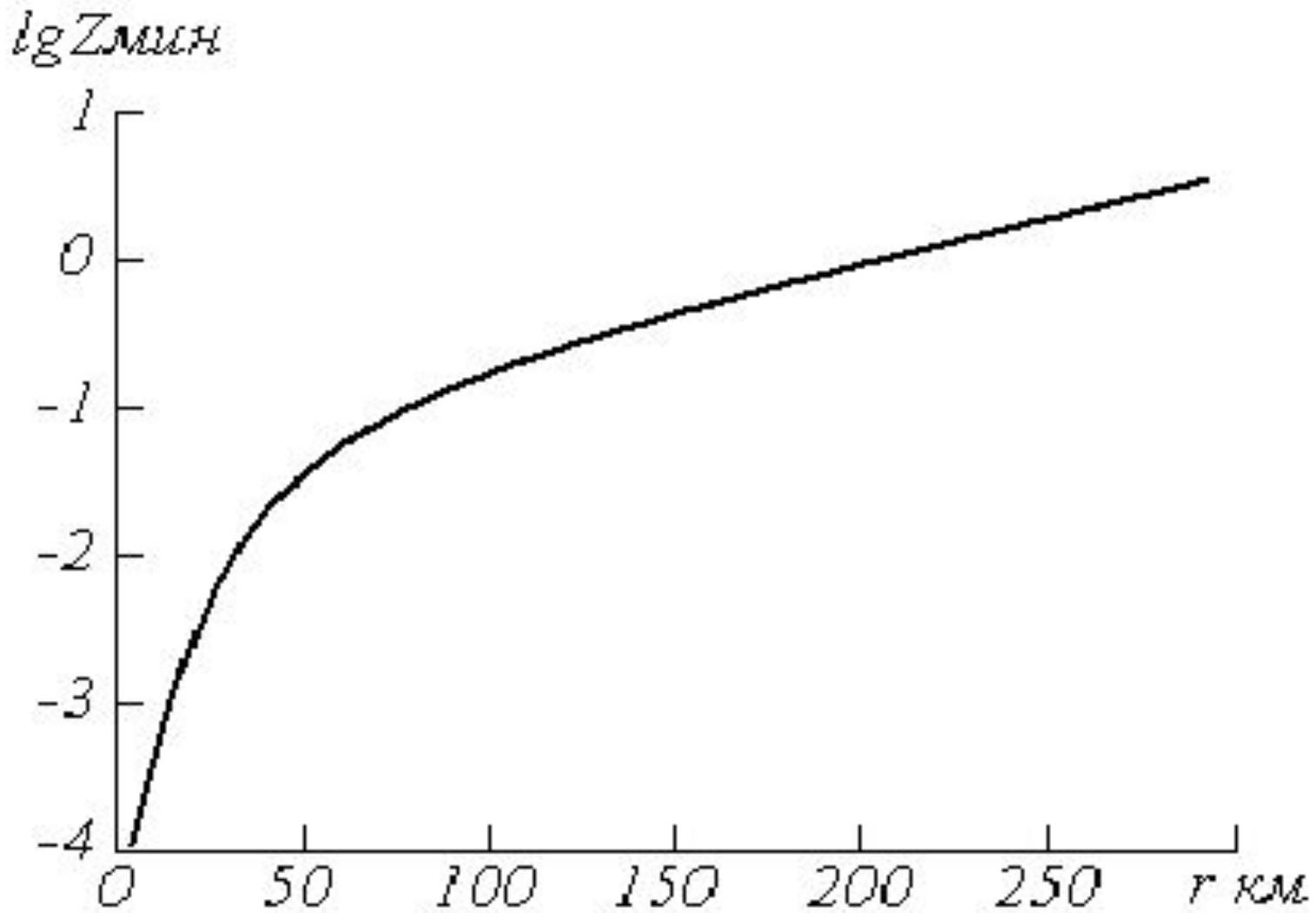
Для этого решим основное уравнение радиолокации (рабочий вид) относительно $\lg Z_a$ при $R = R_{пр}$:

$$\lg Z_{a \min} = 0.1 (20 \lg R_{пр} - \Pi'_{РЛ} + k_{разл})$$

Определим значение **минимальной радиолокационной отражаемости** $Z_{a \min}$, при которой метеорологический объект, находящийся на предельном расстоянии может быть обнаружен МРЛ с заданным метеорологическим потенциалом (например, серийно выпускаемой МРЛ). Для этого решим основное уравнение радиолокации (рабочий вид) относительно $\lg Z_a$ при $R = R_{\text{пр}}$:

$$\lg Z_{a \min} = 0.1 (20 \lg R_{\text{пр}} - \Pi'_{\text{РЛ}} + k_{\text{разл}})$$

Определение: минимальная радиолокационная отражаемость метеорологического объекта $Z_{a \min}$ - это такая отражаемость, при которой МРЛ с заданным метеорологическим потенциалом может уверенно обнаружить этот объект во всем поле «зрения» локатора, т.е. при $R \leq R_{\text{пр}}$.



Минимально обнаруживаемая радиолокационная отражаемость в зависимости от расстояния при заданном потенциале

Факторы, влияющие на работу МРЛ

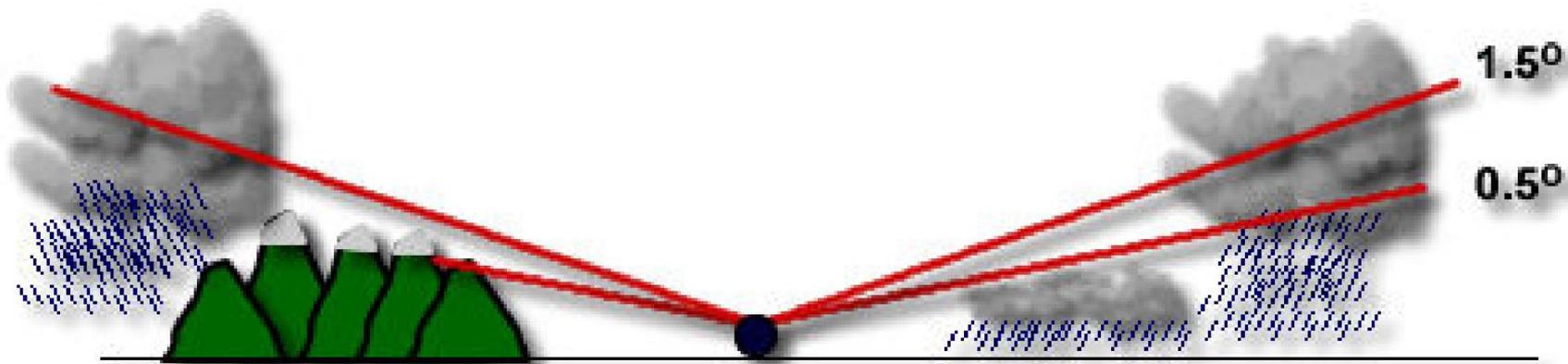


Иллюстрация блокировки радиолокационного луча препятствиями (на рисунке – слева).

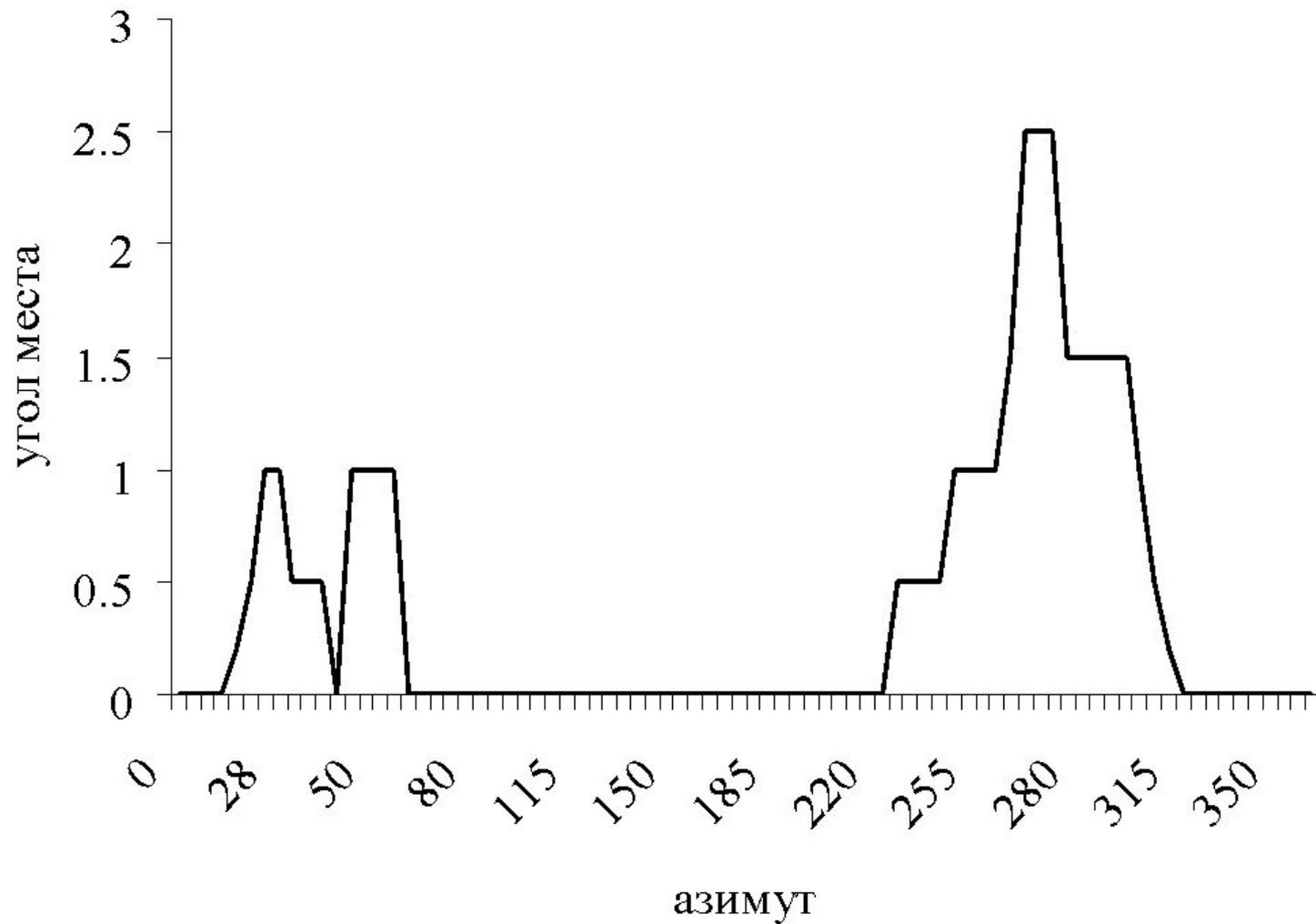
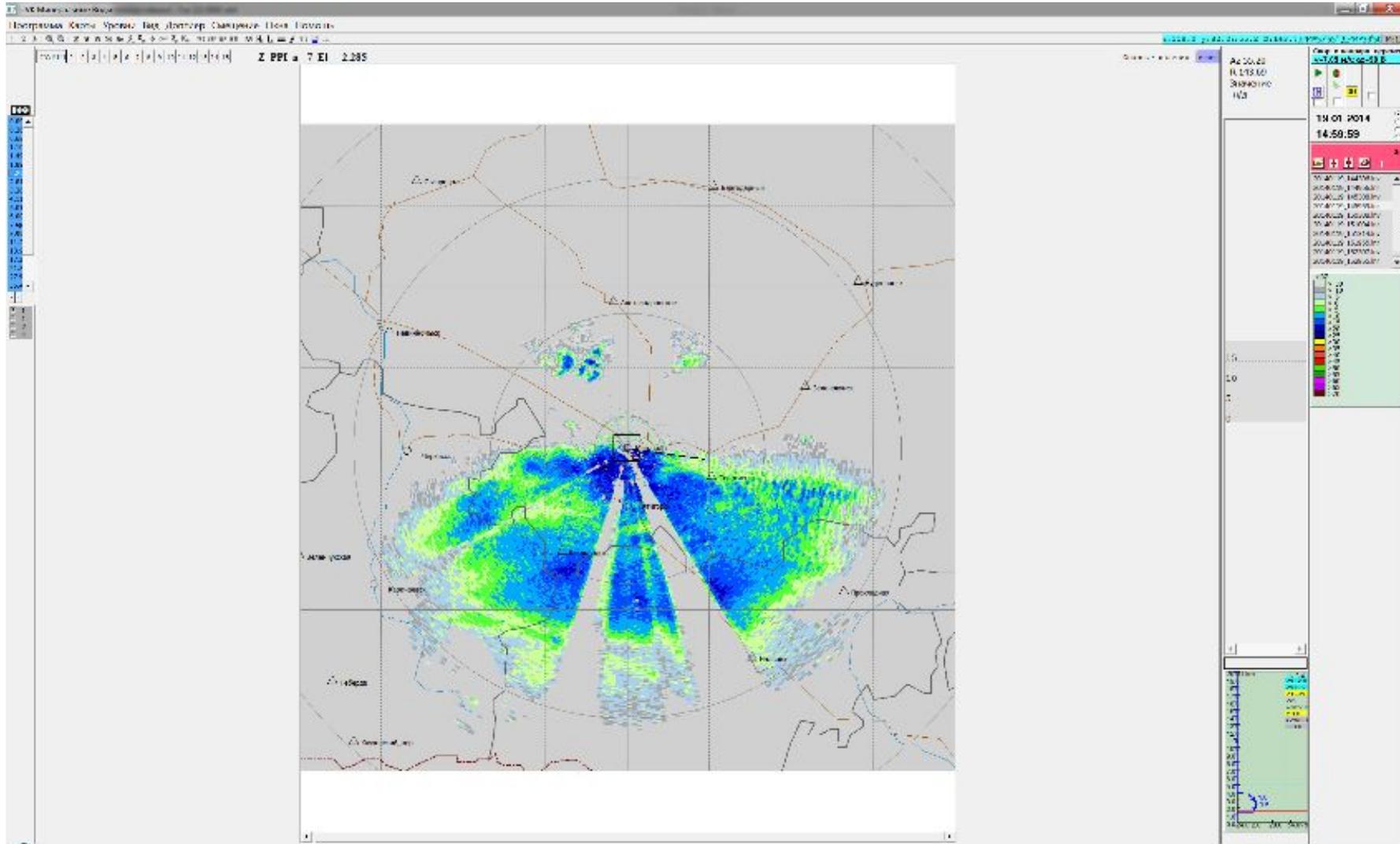
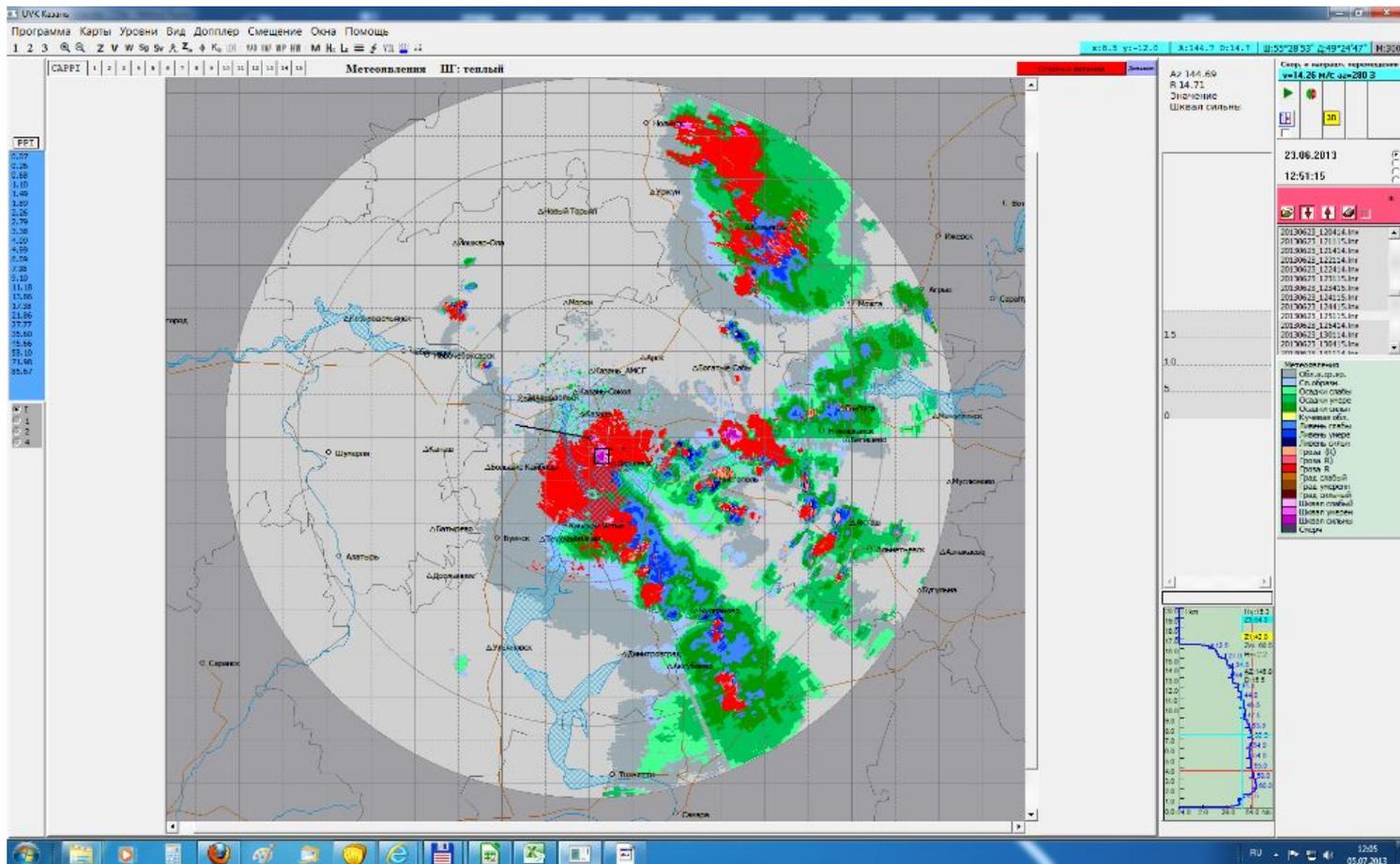


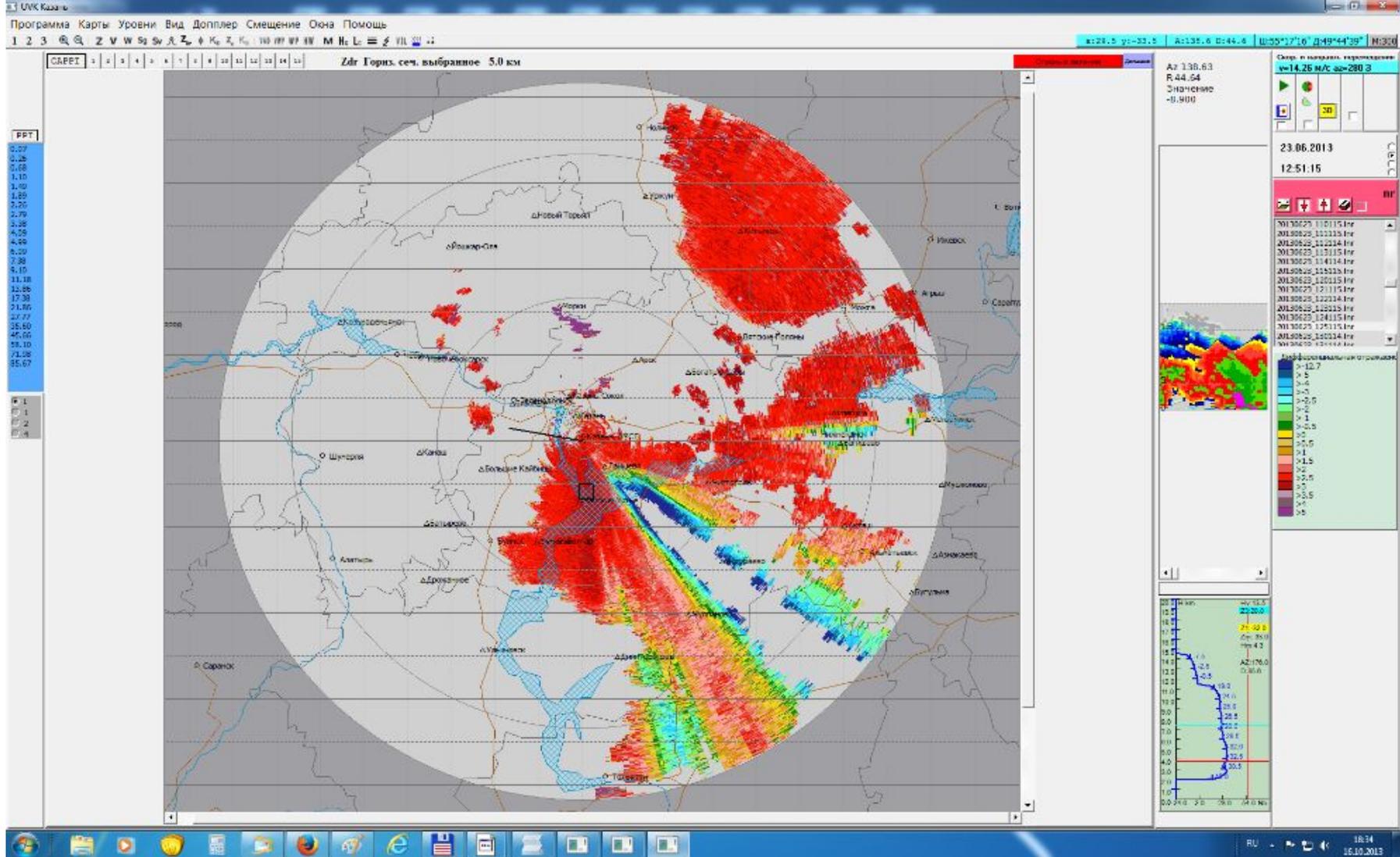
График закрытости горизонта в районе МРЛ-5, АМСГ
Томск





Карта ОЯ ДМРЛ-С «Казань» за 23.06.13 12:51 ВСВ.

Сектор по азимутам с 128° - по 137°, экранированный мощной конвективной зоной Св со шквалами, грозами, ливнями, расположенной вблизи ДМРЛ, оказался «пустым», без ОЯ.



Карта Zdr на высоте 5км, ДМРЛ-С «Казань» за 23.06.13 12:51 ВСВ с пустым сектором по азимутам с 128-137°, экранированным мощной конвективной зоной

Какие будут вопросы ?