



МЕТОД ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ВОЗВРАТНО- НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

Докладчик:

Зубков Михаил Павлович

Преимуществами КВ-связи

- ▶ Оперативность установления прямой связи на большие расстояния,
- ▶ Простота организации радиосвязи с подвижными объектами,
- ▶ Возможность обеспечения связи через большие труднодоступные пространства
- ▶ Низкая стоимость одного канала на километр дальности связи



Недостатки КВ-связи

- ▶ Резкое затухание сигнала на трассе радиосвязи
- ▶ Различный характер замирания сигнала
- ▶ Ограниченная ёмкость используемого диапазона частот.
- ▶ Зависимость качества связи от времени суток, года и состояния ионосферы.

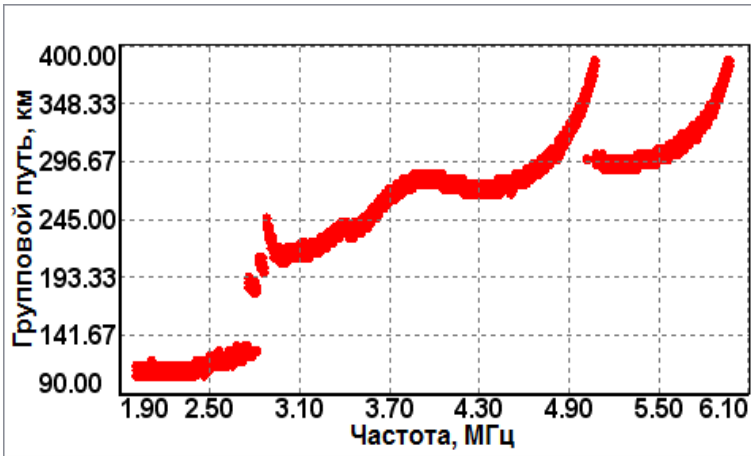


Методы зондирования ионосферы

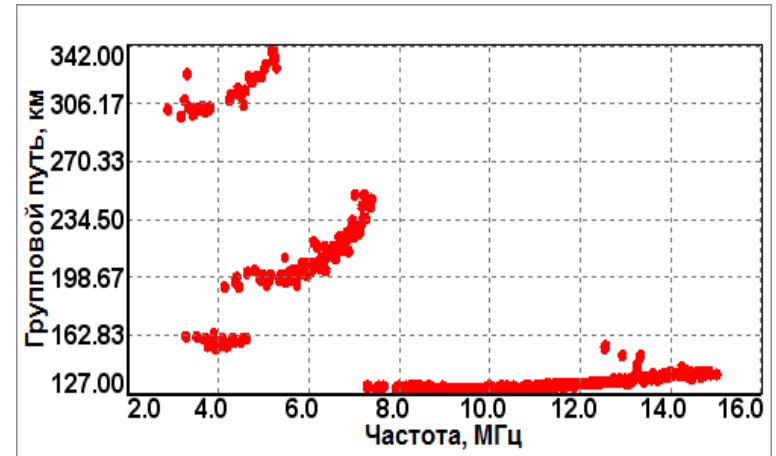
- ▶ Вертикальное зондирование (ВЗ)
- ▶ Наклонное зондирование (НЗ)
- ▶ Возвратно-наклонное зондирование (ВНЗ)



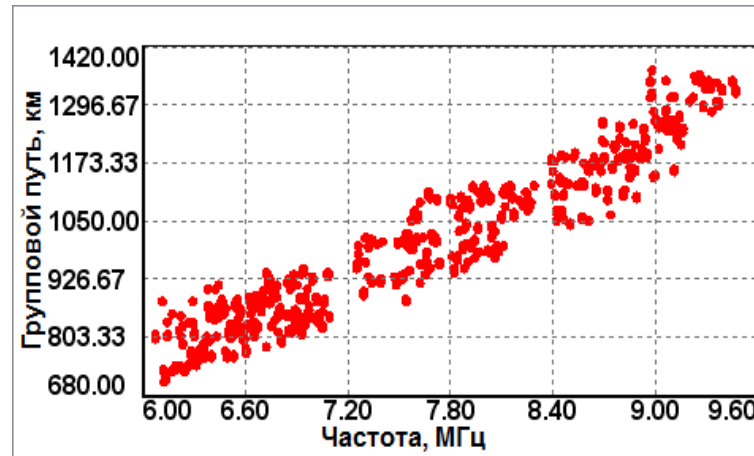
Типовые ионограммы



Ионограмма ВЗ



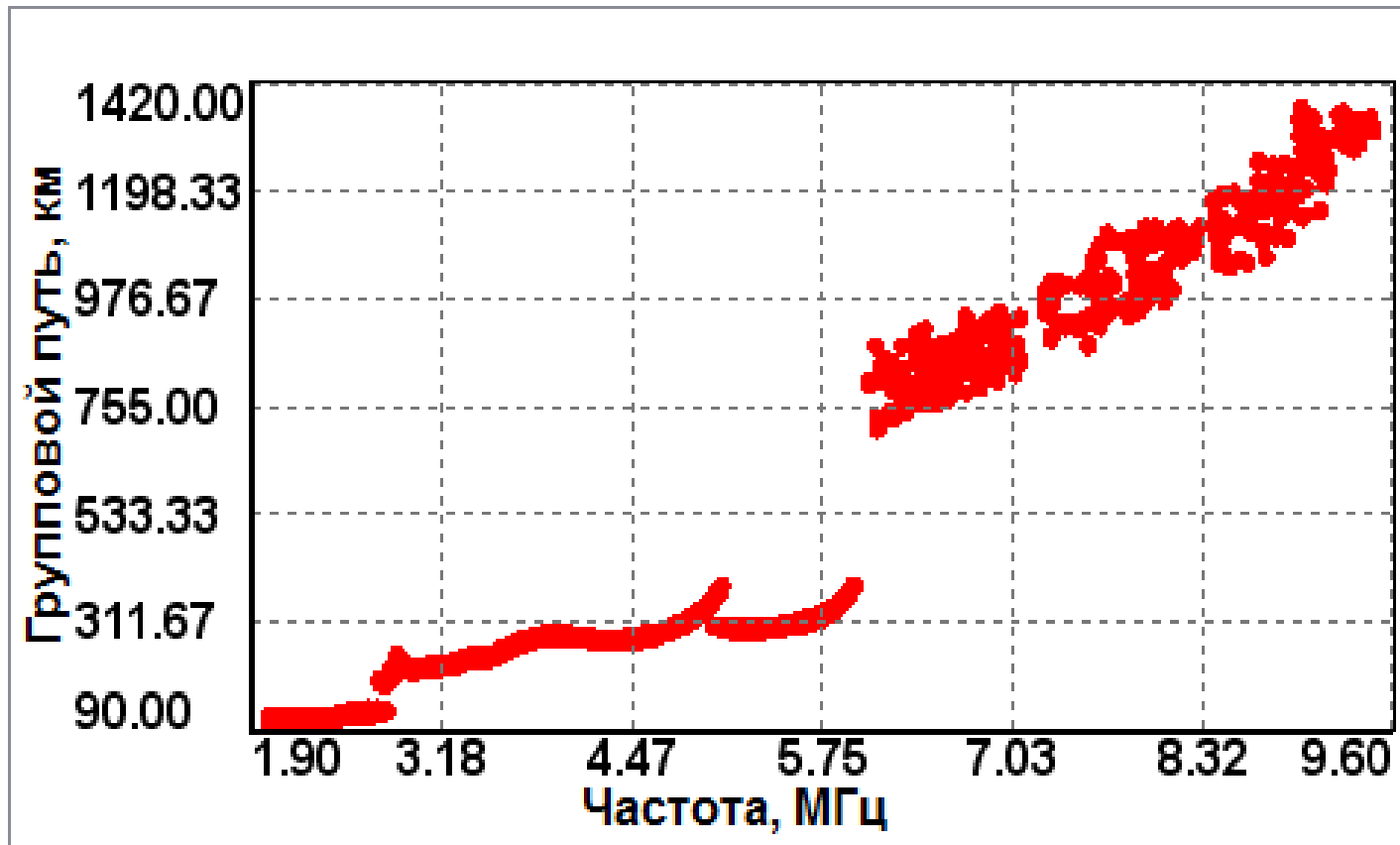
Ионограмма НЗ



Ионограмма ВНЗ



Ионограмма совместного зондирования методами ВЗ и ВНЗ

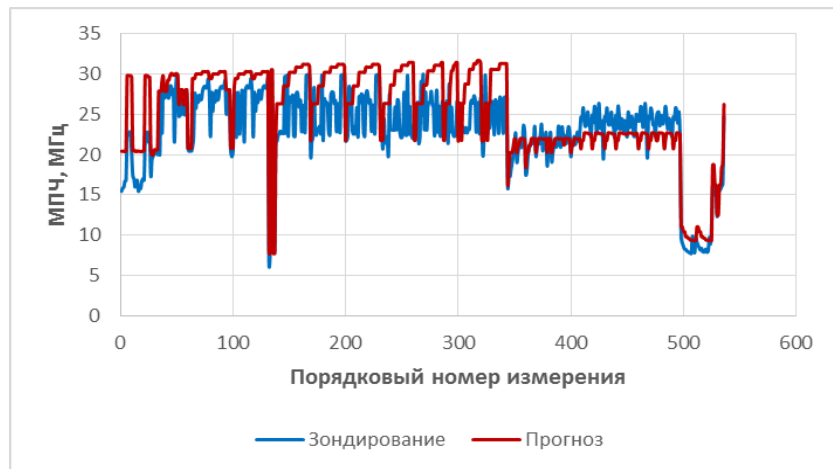


Описание эксперимента

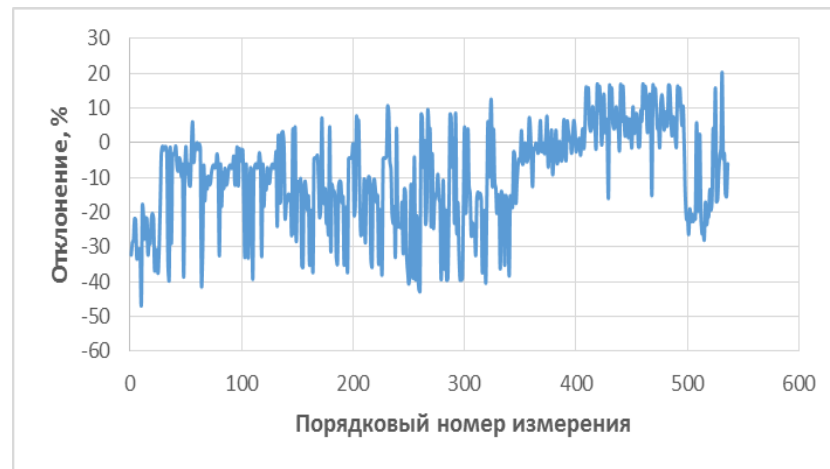
- ▶ Место проведения – г. Омск.
- ▶ Время проведения: сентябрь 2011 г.
- ▶ Уровень солнечной активности на время проведения эксперимента определялся значением числа Вольфа=89 [6].
- ▶ В г. Омске проводился прием сигналов ЛЧМ ионозонда, расположенного в г. Иркутске.
- ▶ Количество экспериментально измеренных в различных условиях значений МПЧ радиотрасс равнялось 536



Результаты эксперимента



Ход МПЧ



Относительное отклонение

Математическое ожидание – минус 9,8 %;

Медианное значение – минус 7,5 %;

Среднеквадратическое отклонение – 14,2;

Коэффициент корреляции – 0,83.



Использованные приближения

- ▶ Отсутствие магнитного поля Земли
- ▶ Параболическая модель распределения электронной концентрации в ионосфере
- ▶ Приближение сферической Земли и ионосферы



Формулы расчета эквивалентной длины полного пути (p) и расстояние по земле (D)

$$p = p_1 + p_2 = 2 \cdot x \cdot y_m \cdot \ln \frac{\left(1 - \frac{x^2}{R} y_m\right) \sqrt{1 - x^2 \left(1 - 2 \frac{4 - x^2}{R} y_m\right) \left(\frac{2h_0}{R} + \sin^2 \alpha\right)}}{1 - x \cos i_0 \sqrt{1 - \frac{4}{R + h_0} Z_m - \frac{x^2}{R + h_0} Z_m}} +$$

$$+ \frac{2R \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha - i_0\right)}{\sin i_0}$$

$$D = D_1 + D_2 = \frac{R}{R + h_0} \sin i_0 p_1 + 2R \left(\frac{\pi}{2} - \alpha - i_0\right)$$

где i_0 – угол падения на ионосферу, $f_{кр}$ – критическая частота, f – рабочая частота, α – угол подъема луча, h_0 – высота нижней границы слоя, h_m – высота максимума ионизации, $y_m = h_m - h_0$ – полутолщина слоя, R – радиус Земли

$$\alpha = \arccos\left(\frac{R + h_0}{R} \sin(i_0)\right) \quad x = f / f_{кр}$$



Формулы расчета координат

$$lat = \arcsin \sin lat1 \cdot \cos d_r + \cos lat1 \cdot \sin d_r \cdot \cos tc$$

$$dlon = \arctan \left(\frac{\sin tc \cdot \sin d_r \cdot \cos lat1}{\cos d_r - \sin lat1 \cdot \sin lat} \right)$$

$$lon = \text{mod } lon1 - dlon + \pi, 2 \cdot \pi - \pi$$

где $lat1, lon1$ – широта и долгота центра в радианах,

tc – азимут точки в радианах,

d_r – расстояние до точки в радианах,

lat, lon – широта и долгота искомой точки в радианах,

$\text{mod}(x,y)$ – функция возвращает остаток от деления x на y

$$d_r = \frac{d_{km}}{R_{km}}$$

d_r – расстояние в радианах, d_{km} – расстояние в километрах, R_{km} – радиус в километрах (6371 км)



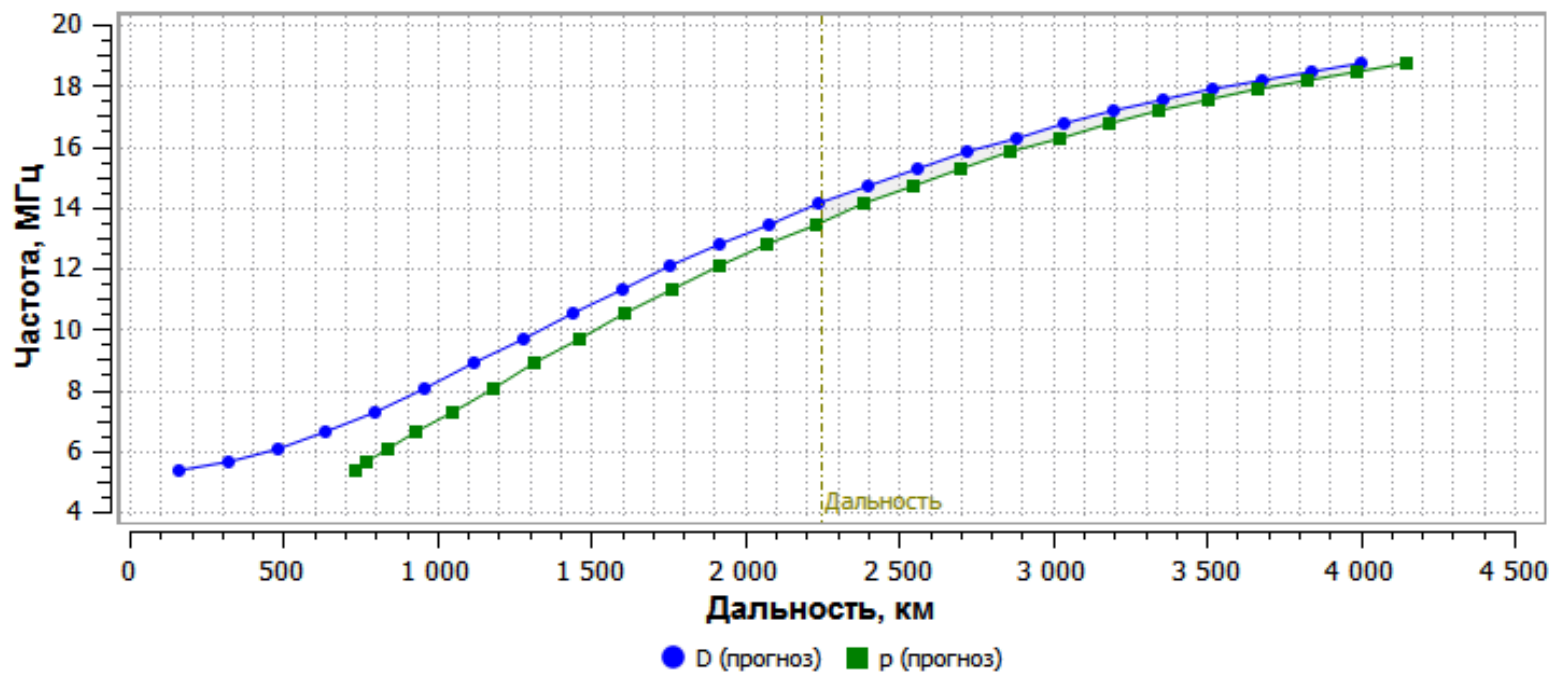
Последовательность действий при интерпретации результатов зондирования

- ▶ Выбор значения индекса солнечной активности
- ▶ Расчет МПЧ и параметров ионосферных слоев для каждой промежуточной радиотрассы (получение зависимости МПЧ от расстояния по земле)
- ▶ Расчет эквивалентной длины полного пути для каждой промежуточной радиотрассы (получение зависимости МПЧ от эквивалентной длины полного пути)
- ▶ Расчет коэффициента корреляции полученной зависимости с результатами экспериментальных данных



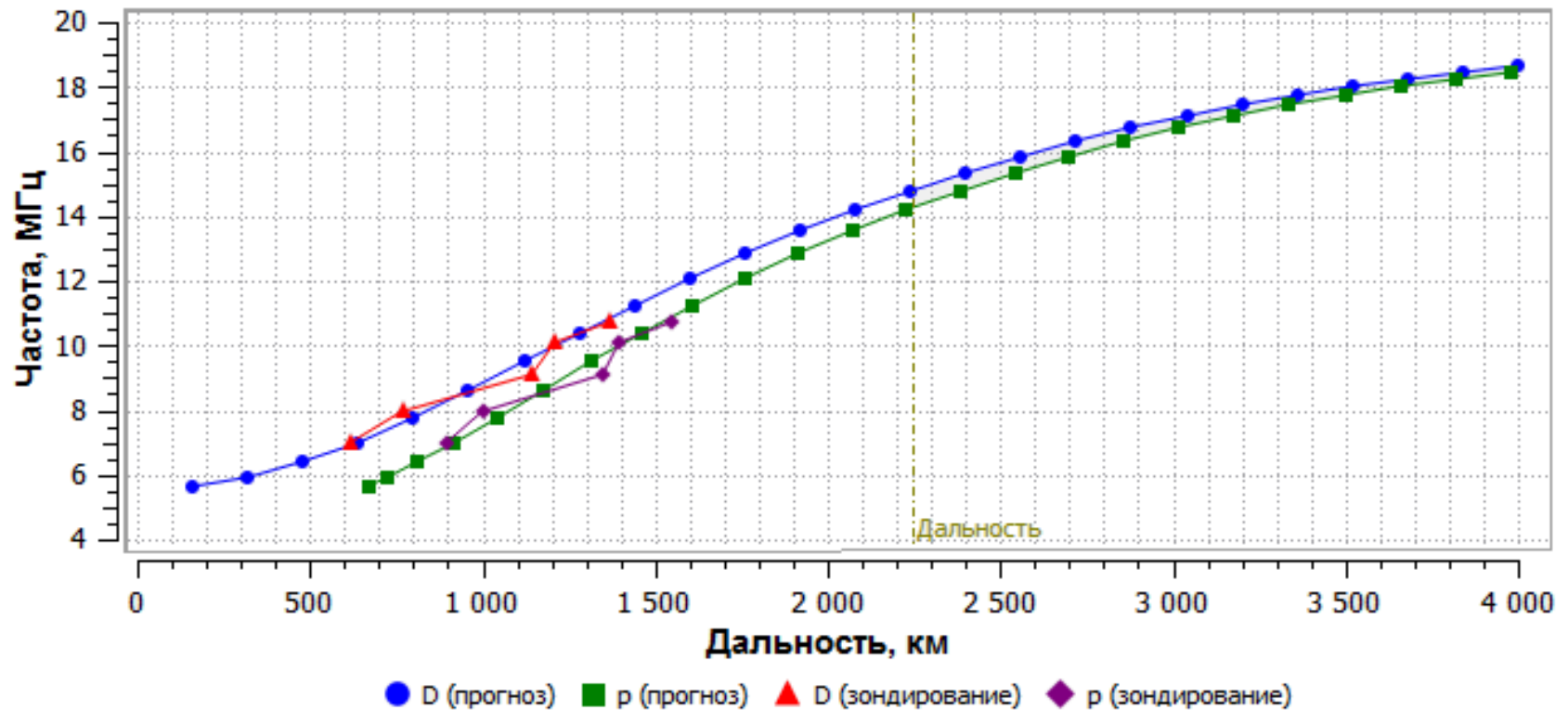
Пример интерпретации результатов возвратно-наклонного зондирования

- ▶ Зондирующий центр располагается в г. Омске (54 58' с. ш. 73 23' в. д.)
- ▶ Зондирование проводится в сторону г. Москвы (55 45' с. ш. 37 37' в. д.)
- ▶ Расстояние между объектами 2237 км, азимут – 287°.



Теоретическая ДЧХ ВНЗ

Результат интерпретации экспериментальных данных



Выводы

- ▶ Приведена методика интерпретации результатов возвратно-наклонного зондирования ионосферы с использованием долгосрочного прогноза, основанного на полуэмпирической модели ионосферы.
- ▶ Данная методика интерпретации результатов возвратно-наклонного зондирования позволяет получать углы прихода радиоволн, ионосферный индекс (эффективное число Вольфа).
- ▶ При использовании ионосферного индекса есть возможность воспользоваться известной методикой назначения ОРЧ по долгосрочному прогнозу, но откорректированному по текущим экспериментальным данным ВНЗ.



Спасибо за внимание!