

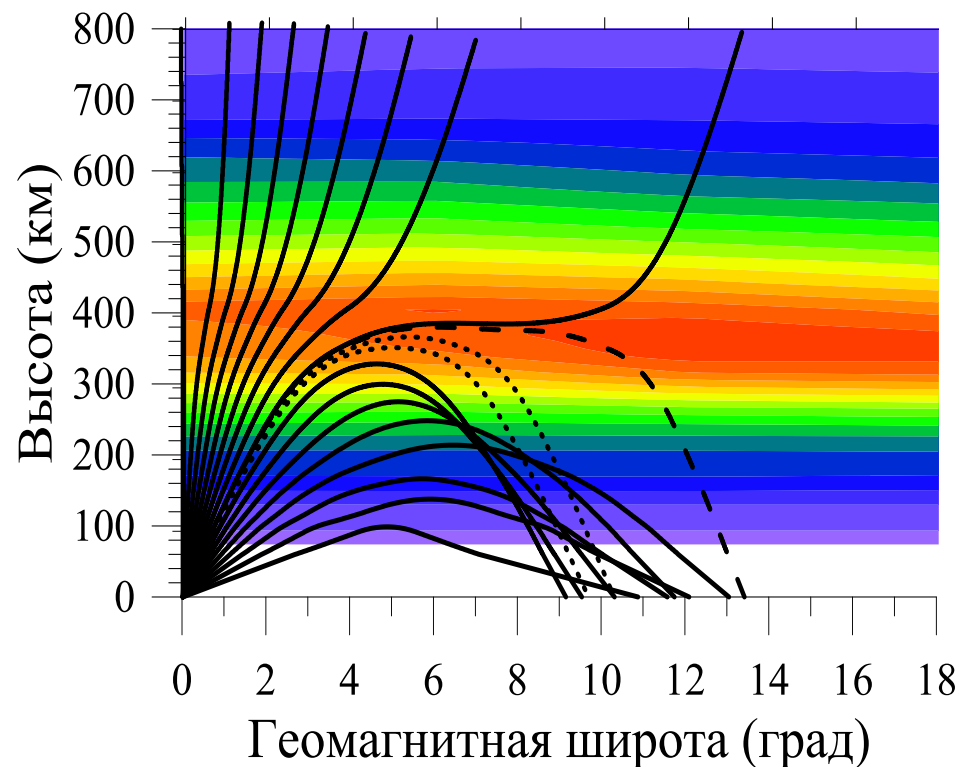
# СРАВНЕНИЕ ДВУХ ПОДХОДОВ ДЛЯ ТРАССИРОВКИ КОРОТКИХ РАДИОВОЛН В ИОНОСФЕРЕ

**Д.С. Котова<sup>1,2</sup>, И.А. Носиков<sup>1</sup>, М.В. Клименко<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*КФ ИЗМИРАН им. Н.В. Пушкина, Калининград, Россия*

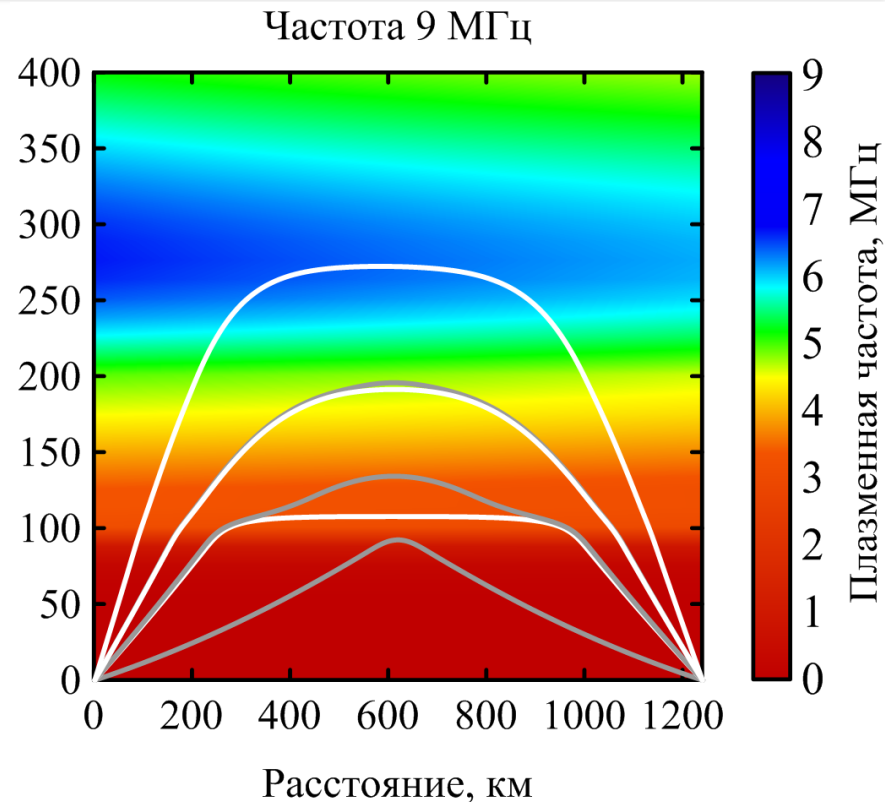
<sup>2</sup>*Университет Осло, Физический факультет, Осло, Норвегия*

# Актуальность



Модель с начальными условиями

[Захаров, Черняк, 2007; Котова, 2018]



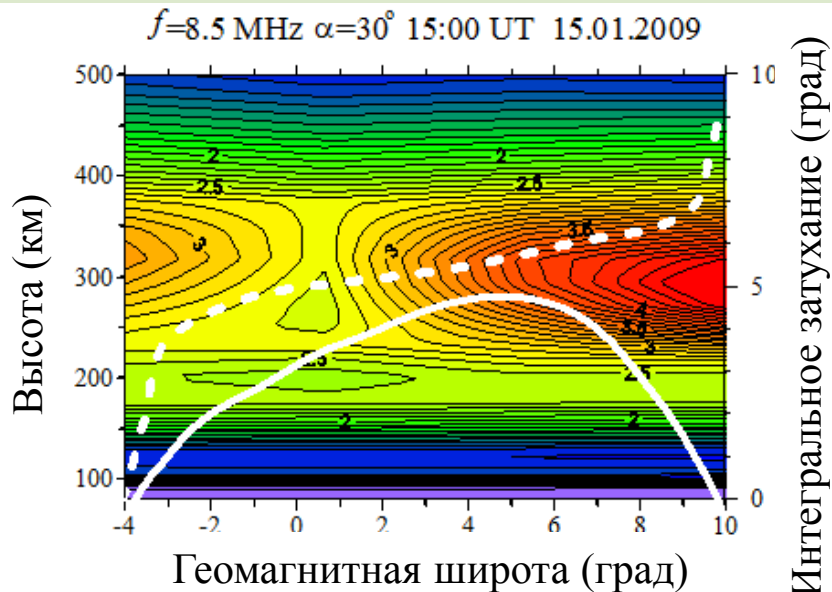
Модель с граничными условиями

[Nosikov et al., 2017]

# Описание метода характеристик

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\mathbf{r}}{d\tau} = \mathbf{p} - Re(n) \frac{\partial Re(n)}{\partial \mathbf{p}} \equiv \mathbf{s}(\mathbf{r}, \mathbf{p}), \\ \frac{d\mathbf{p}}{d\tau} = Re(n) \frac{\partial Re(n)}{\partial \mathbf{r}}, \\ \psi = \psi^0 + \int_{\tau^0}^{\tau} \mathbf{p} \left( \mathbf{p} - Re(n) \frac{\partial Re(n)}{\partial \mathbf{p}} \right) d\tau, \\ k_{\text{диф}} = 8.68(\omega/c)Im(n), \\ k_{\text{инт}} = \int_{\sigma_0}^{\sigma} k_{\text{диф}} \cos \gamma d\sigma. \end{array} \right.$$

$n$  – показатель преломления, причем  $n = Re(n) + jIm(n)$ ,  $Im(n) \ll Re(n)$ ;  
 $\mathbf{r}$  – радиус-вектор точки наблюдения;  
 $\mathbf{p}$  и  $\mathbf{s}$  – векторы импульса и луча;  
 $\tau$  – параметр интегрирования;  
 $\psi^0 \equiv \psi(\tau^0)$  – начальное значение эйконала;  
 $\omega$  – частота волны;  $c$  – скорость света;  $\gamma$  – угол между  $\mathbf{p}$  и  $\mathbf{s}$ ;  
 $\sigma$  – длина вдоль лучевой траектории.



Haselgrove, 1954;  
 Лукин, Спиридонов, 1969

# Вариационный подход. Принцип Ферма

Функционал оптической длины пути:

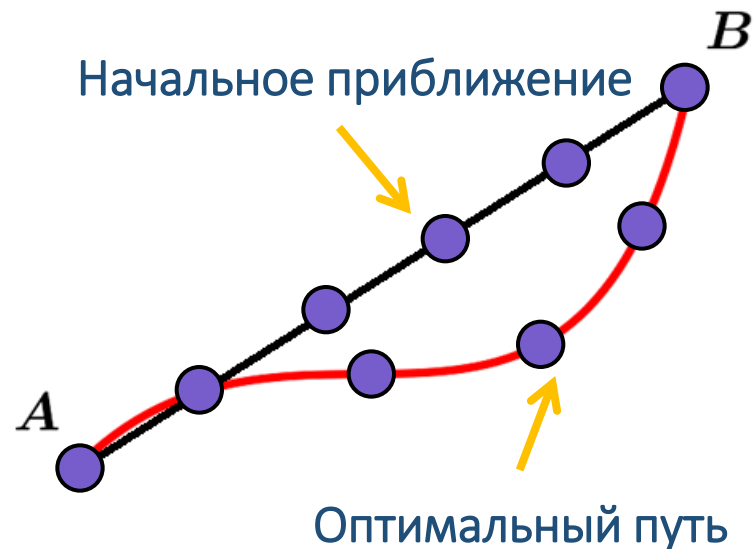
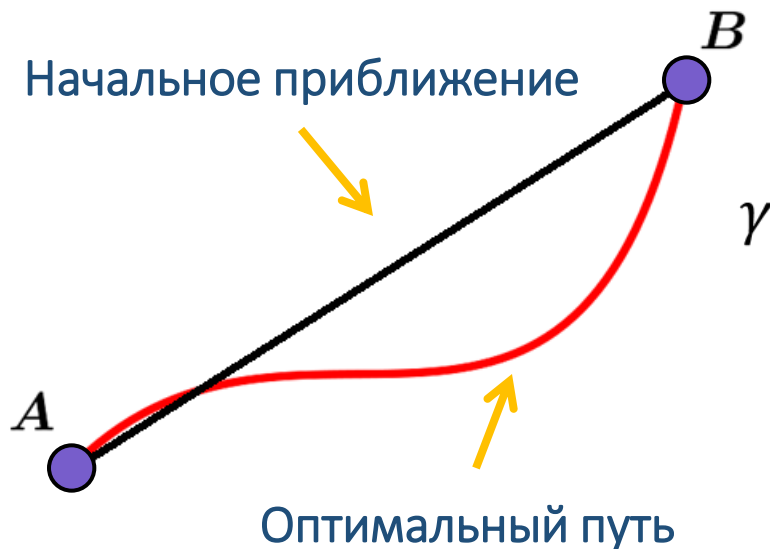
$$S[\gamma] = \int_A^B n(\vec{r}) dl,$$

Принцип Ферма:

$$\delta S = 0, \quad [1]$$

Применяя метод трапеций для функционала  $S[\gamma]$ :

$$S[\gamma] = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (n(\vec{r}_{i+1}) + n(\vec{r}_i)) |\vec{r}_{i+1} - \vec{r}_i|,$$

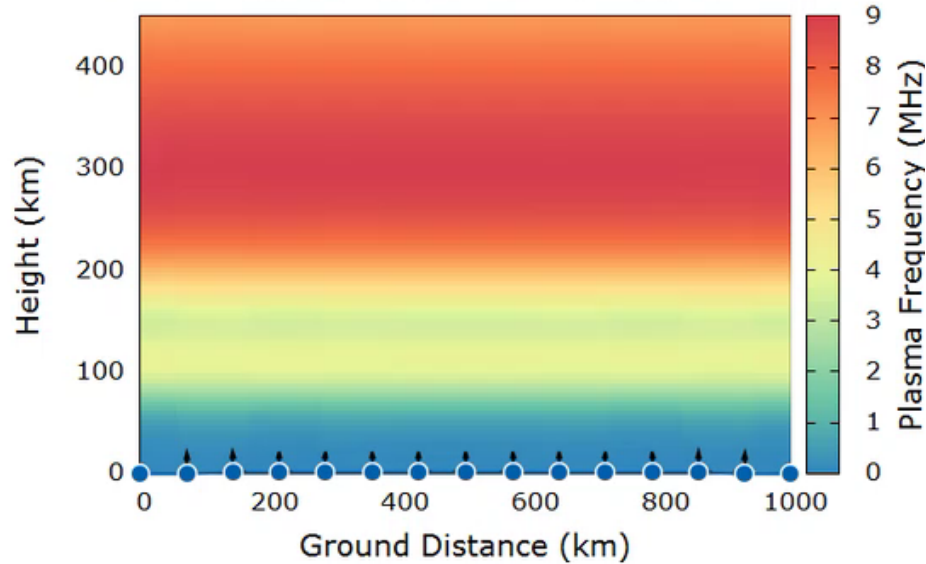


# Взаимодействие двух методов

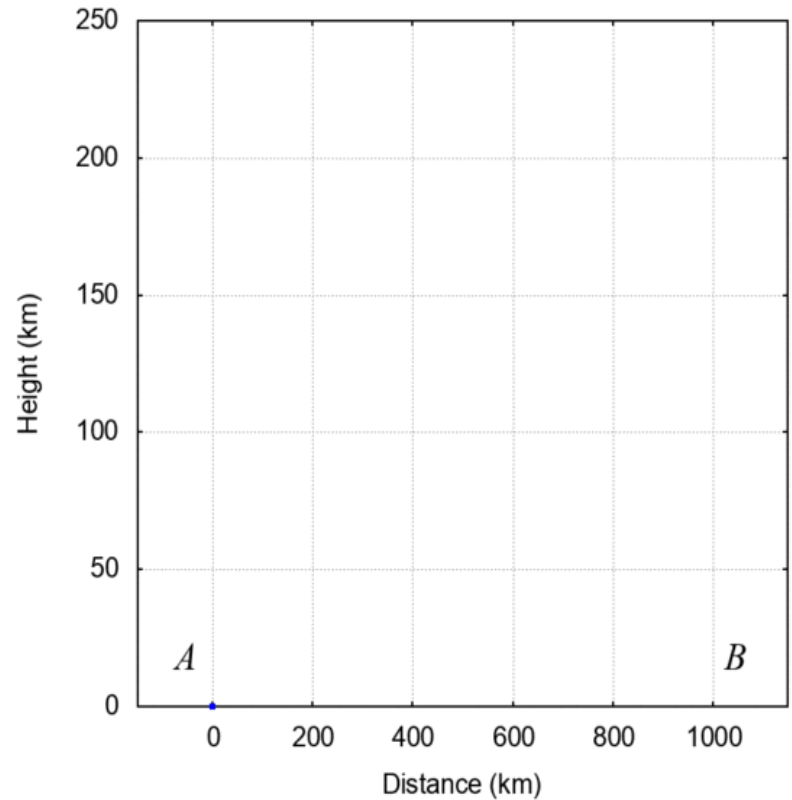
## Вариационный метод

Ray Tracing at Frequency 12 MHz

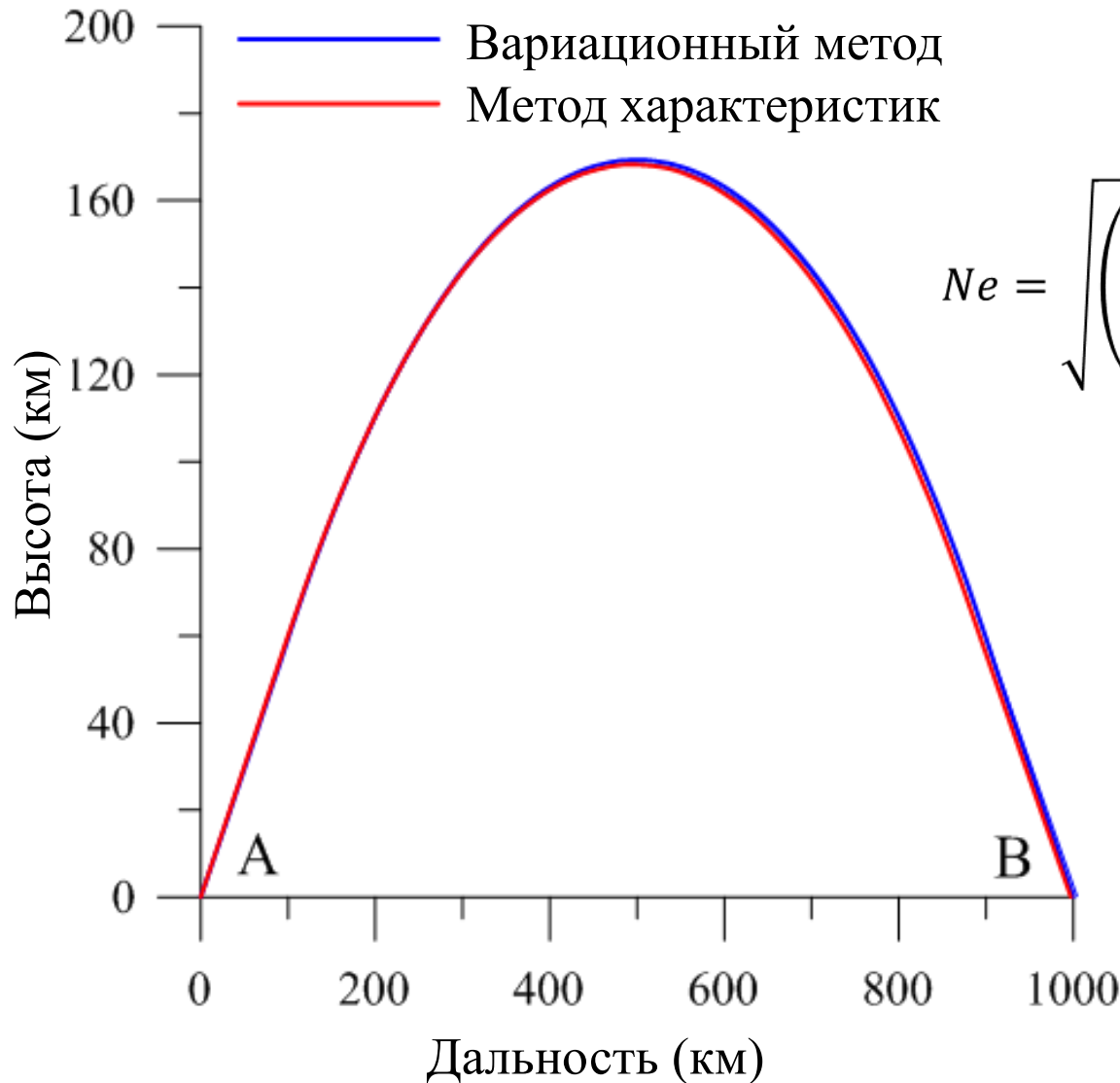
P.: 15, It.: 0, Neg. ev.: 0,  $ev_{min}$ : 0.0007, f: 0.0013



## Метод характеристик



# Сравнение двух подходов



$$Ne = \sqrt{\left(1 - \frac{80.8 Ne_{max}}{f^2} \left(1 - \left(\frac{y - y_0}{y_m}\right)^2\right)\right)}$$

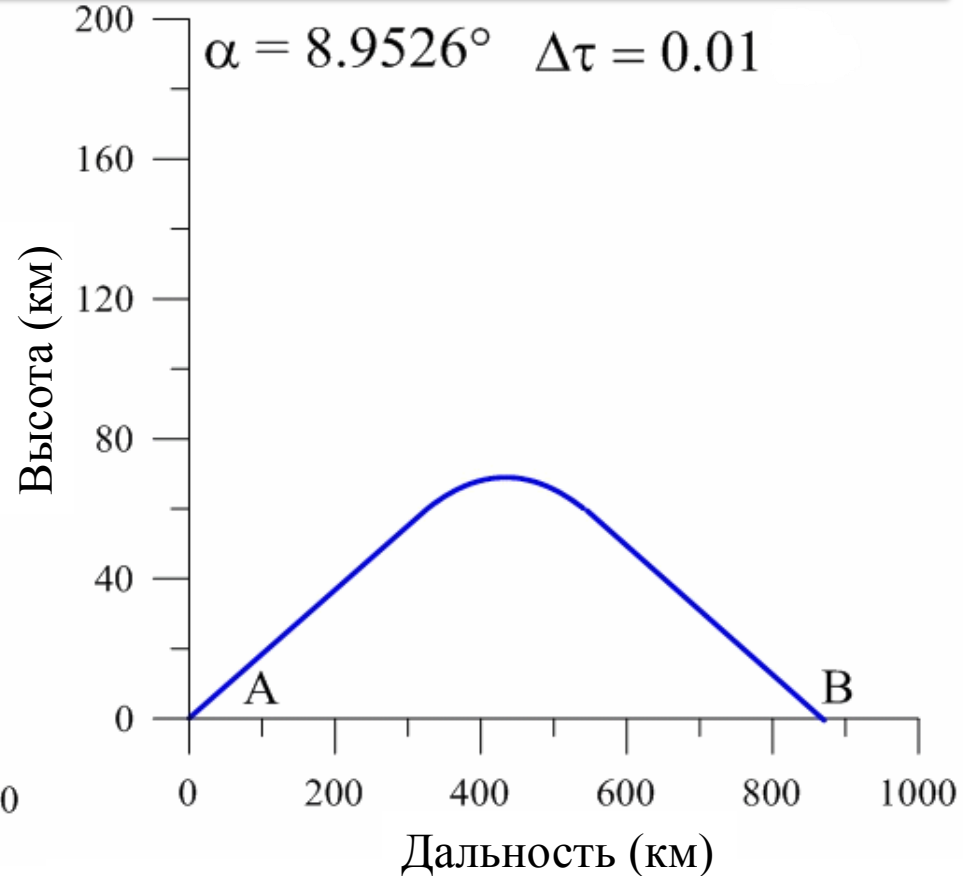
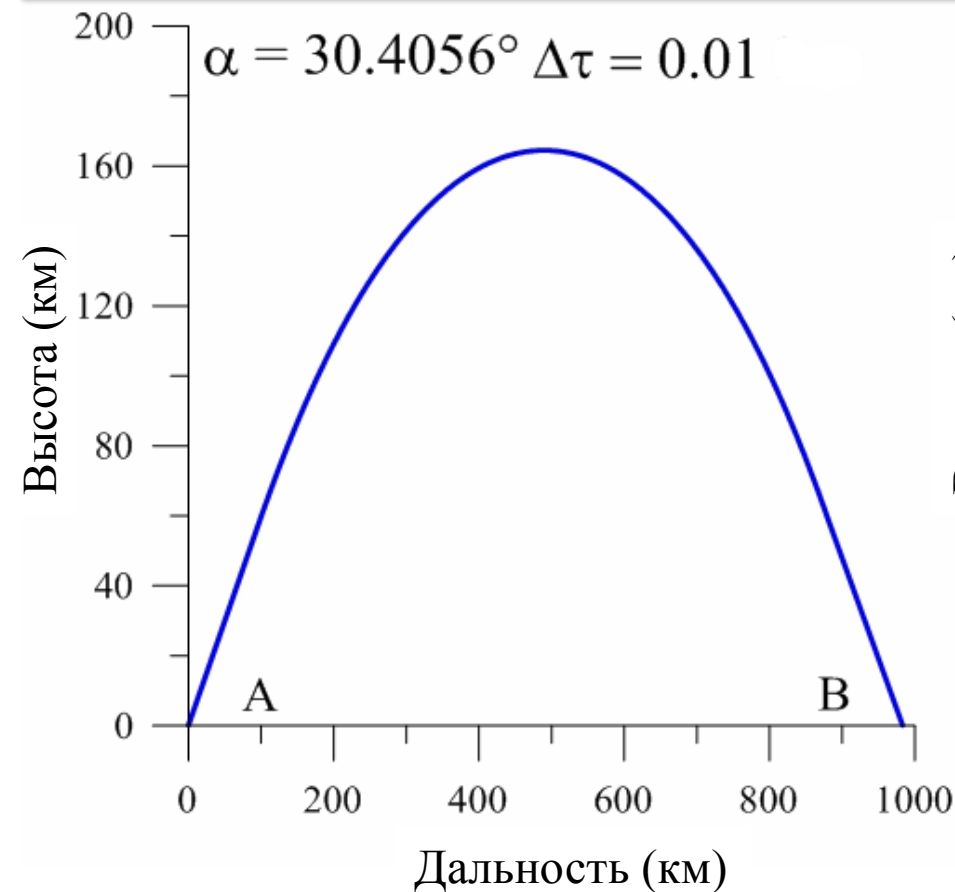
$$Ne_{max} = 10^{12} \text{ (м}^{-3}\text{)}$$

$$y_0 = 300 \text{ (км)}$$

$$y_m = 240 \text{ (км)}$$

$$f \text{ — частота (Гц)}$$

# Взаимодействие двух методов

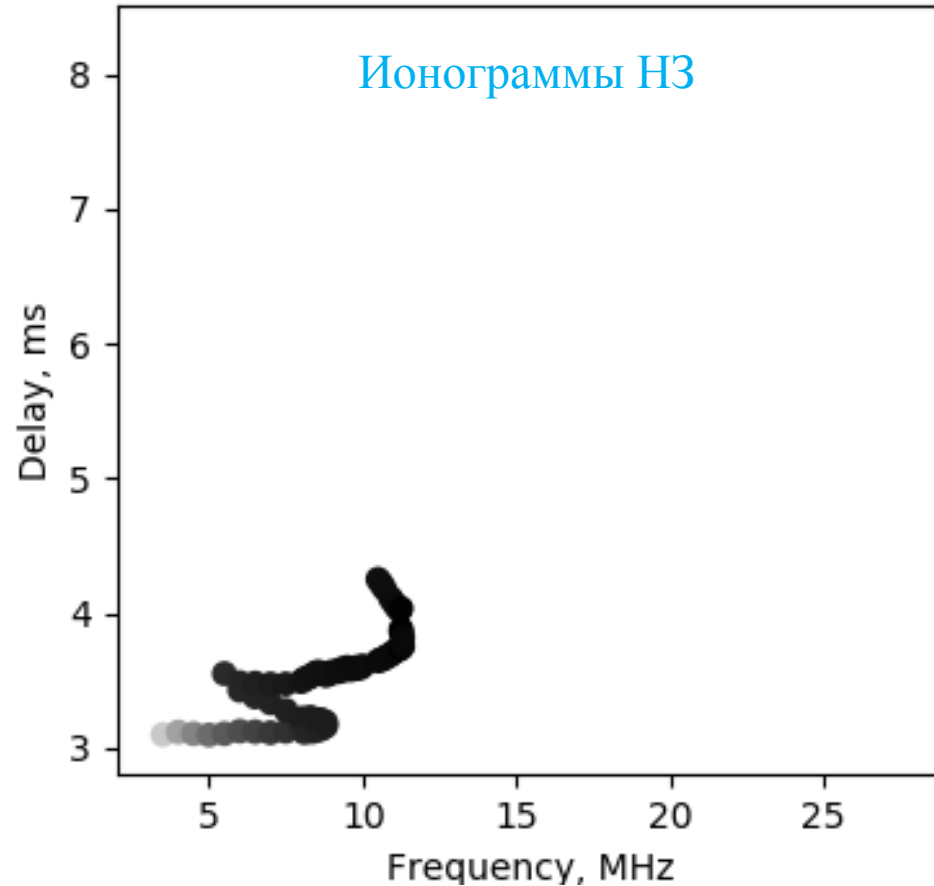


$\alpha$  - угол места

$\Delta\tau$  – нормализованное значение начального шага вдоль трассы  
(параметра интегрирования)

# Области применения и преимущества двух методов

2015-03-19 12:00:00 UT Lovozero-Gorkovskaya





# Заключение

---

- Рассмотрены особенности взаимодействия двух подходов для расчета радиотрасс в изотропной среде, заданной параболическим слоем
- Совместное использование двух подходов позволит оптимальным образом моделировать ионограммы НЗ с учетом поглощения в среде, а также проводить исследование влияния среды на характеристики радиоволн при распространении сигнала в заданную точку пространства

*Спасибо за внимание!*

Исследование выполнено при поддержке  
гранта Президента РФ для молодых ученых (МК-2584.2019.5)