

# Исследование лучевых траекторий КВ-радиоволн в естественно и искусственно возмущенной ионосфере на основе данных радиотомографии

М.А. Анненков, Е.С. Андреева,  
И.А. Нестеров, А.М. Падохин

Московский государственный университет  
имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

# Методы

Низкоорбитальная радиотомография (НОРТ):

$$\lambda r_e \int_l N(r, t) d\sigma = \varphi + \varphi_0$$

$\lambda$  – длина зондирующей волны,  $r_e$  – классический радиус электрона,  $N$  – электронная концентрация,  $\varphi$  и  $\varphi_0$  – приведенная и начальная фазы соответственно, интегрирование ведется вдоль луча спутник-приемник  $l$ .

Разрешение по горизонтали 20–30 км

Разрешение по вертикали 30–40 км

Модель IRI2012 – для сравнения

# Методы

Уравнения эйконала в сферической системе координат (2D):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dr}{d\tau} = \frac{dH}{dk_r}, \\ \frac{d\theta}{d\tau} = \frac{1}{r} \frac{dH}{dk_\theta}, \\ \frac{dk_r}{d\tau} = -\frac{dH}{dr} + k_\theta \frac{d\theta}{d\tau}, \\ \frac{dk_\theta}{d\tau} = \frac{1}{r} \left( \frac{dH}{d\theta} + k_\theta \frac{dr}{d\tau} \right) \end{array} \right.$$

$r$  и  $\theta$  – радиус и коширота,  
 $k_r$  и  $k_\theta$  – соответствующие им компоненты  
волнового вектора,  
 $\tau$  – длина группового пути,  
 $H$  – гамильтониан, взятый в форме

$$H = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left[ \frac{c^2}{\omega^2} (k_r^2 + k_\theta^2) - n^2 \right]$$

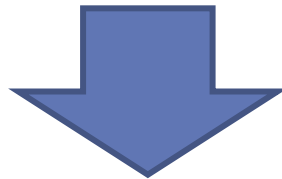
где  $c$  – скорость света,  
 $\omega$  – угловая частота,  
 $n$  – коэффициент преломления,  
вычисляемый по формуле Эпплтона–Хартри

# Методы

Бесстолкновительное приближение ( $Z = 0$ )

Модель геомагнитного поля – IGRF

Метод Рунге-Кутты 4-го порядка

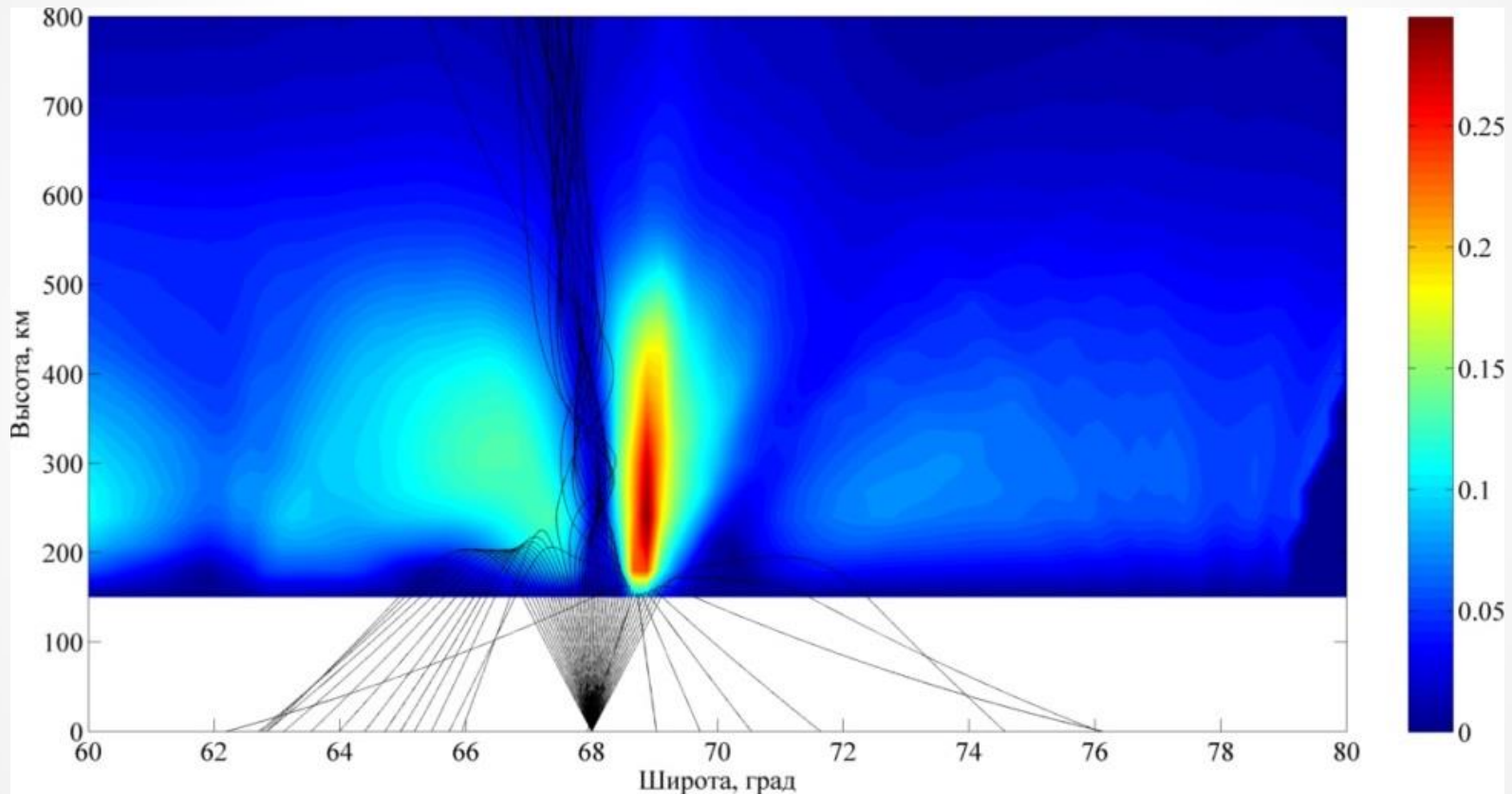


Лучевые траектории КВ-радиоволн

# Результаты

Москва–Мурманск, 16 марта 2015 г., 21:41 UT, X-мода, 4 МГц

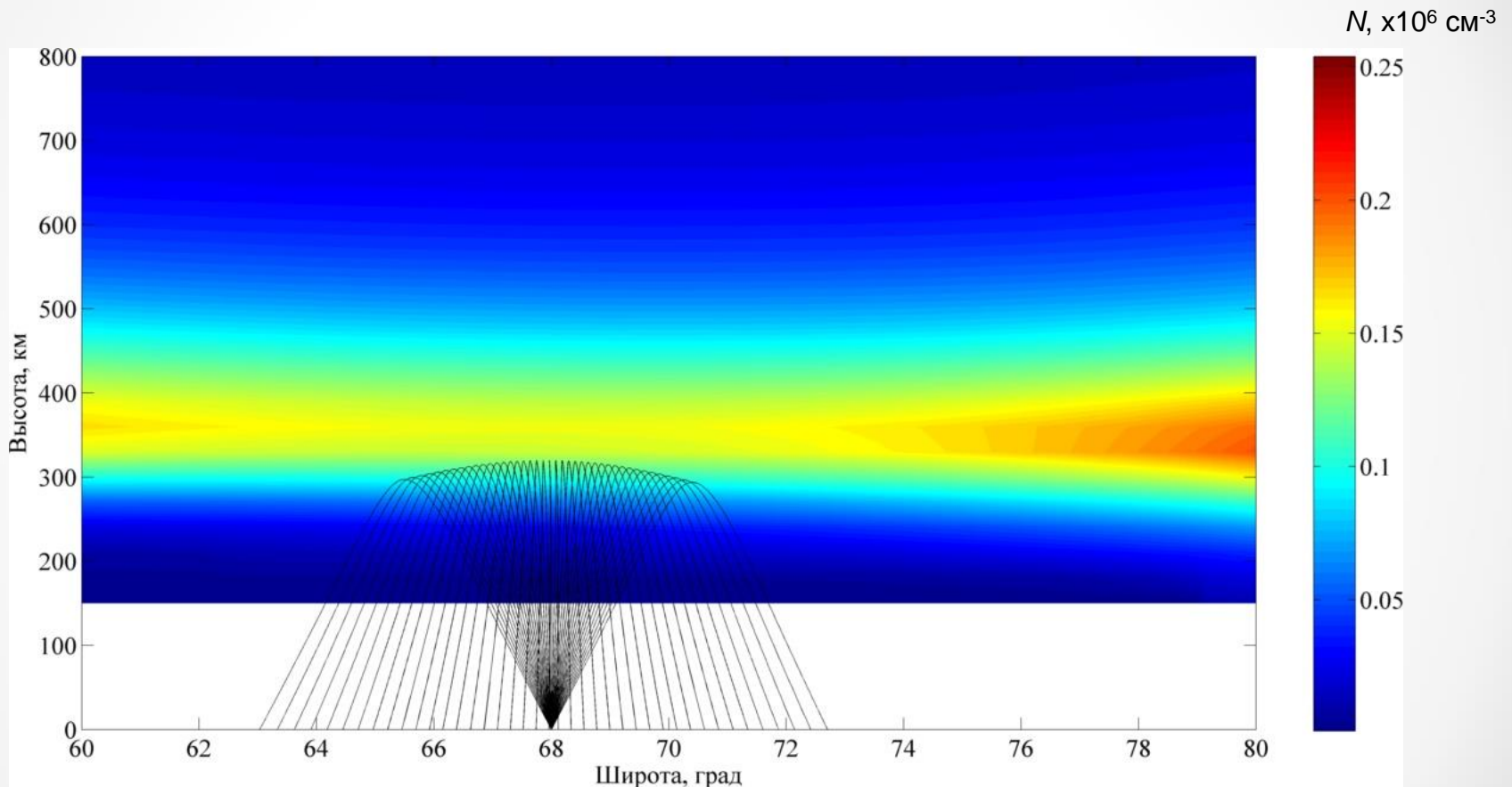
$N, \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$



## НОРТ

# Результаты

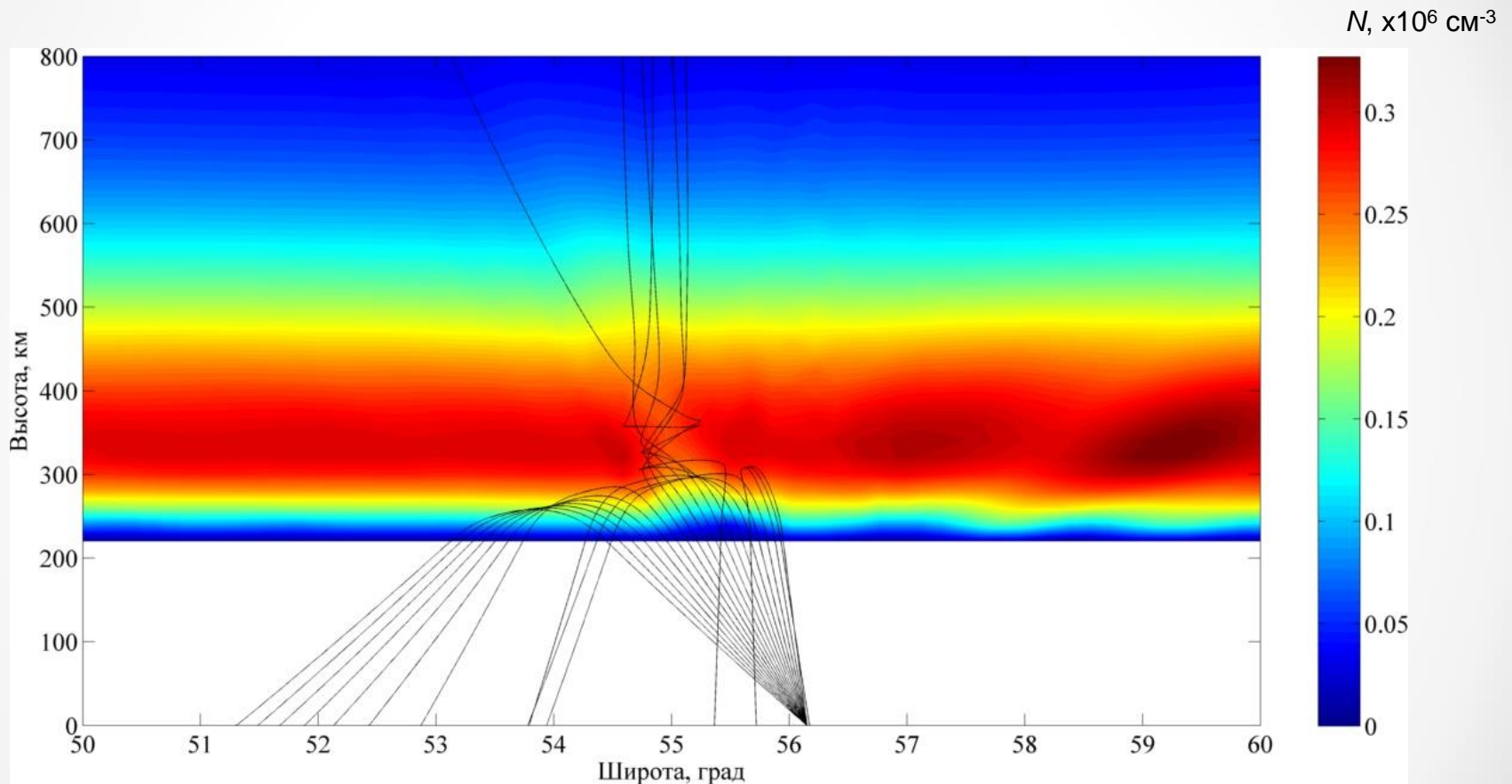
Москва–Мурманск, 16 марта 2015 г., 21:41 UT, X-мода, 4 МГц



IRI2012

# Результаты

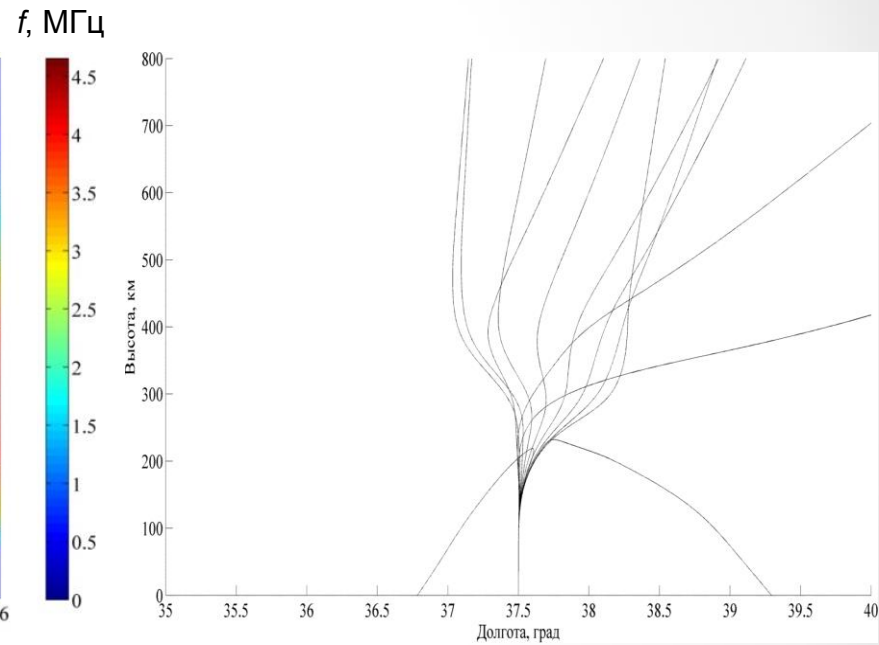
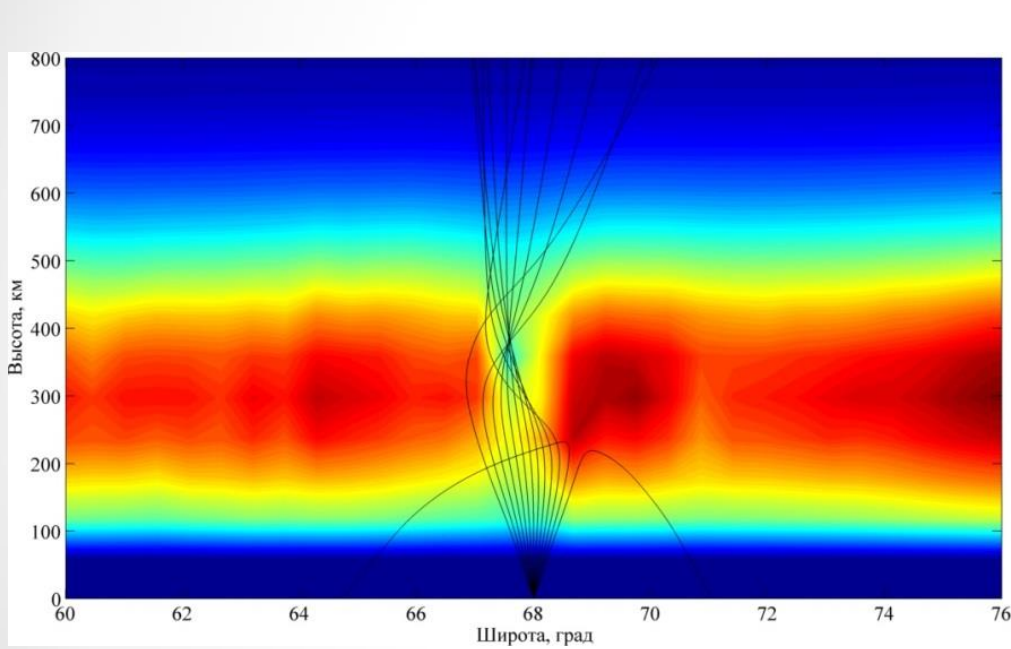
СУРА, 18 августа 2011 г., 18:48 UT, О-мода, 4785 кГц



НОРТ

# Результаты

Москва–Мурманск, 16 марта 2015 г., 22:00 UT, X-мода, 5 МГц



3D



# Выводы

- Пространственные градиенты в распределении электронной концентрации существенно влияют на распространение КВ-радиоволн в ионосфере.
- Обычно используемые ионосферные модели, например, IRI, не всегда могут верно отобразить эти градиенты даже в условиях невозмущенной геомагнитной обстановки.
- В этом случае применение НОРТ-реконструкций может предоставить данные для изучения таких важных особенностей распространения КВ-радиоволн в ионосфере, как, например, эффекты фокусировки и каналирования.

**Спасибо за внимание!**