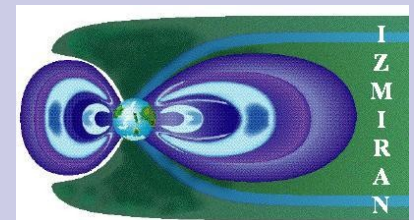


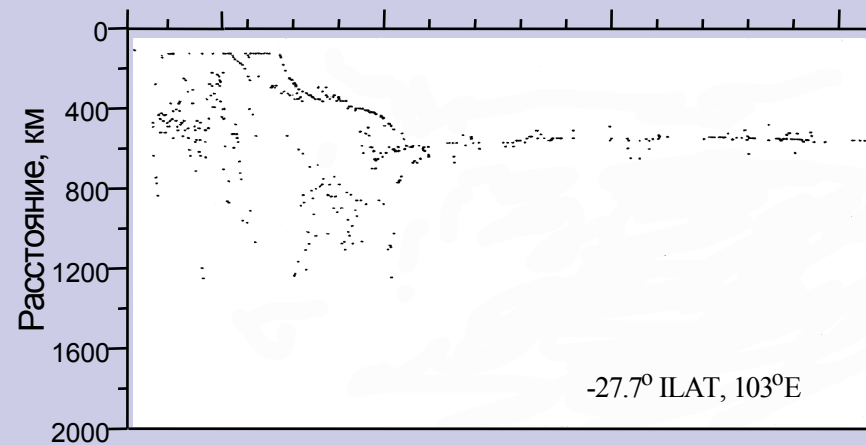
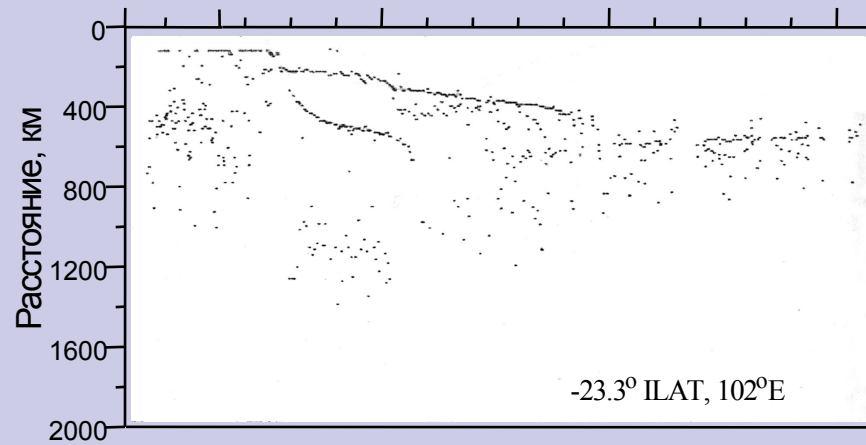
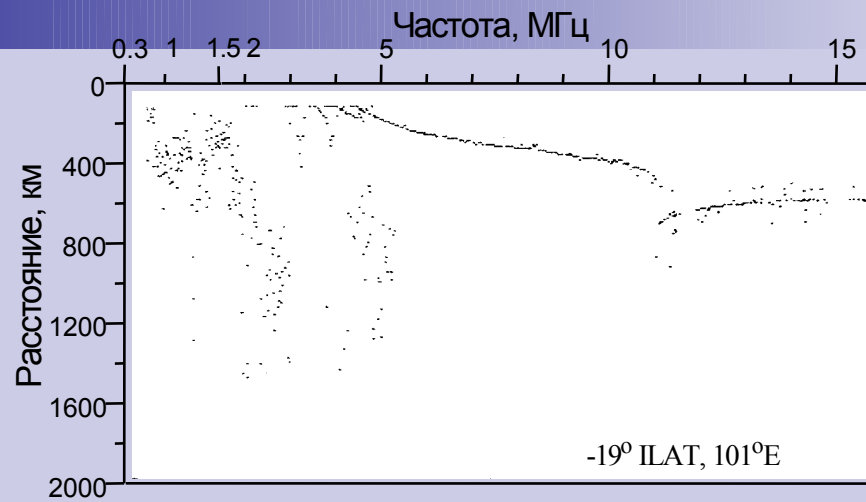
# Особенности распространения радиоволн со спутника ИК-19

Телегин В.А., Карпачев А.Т., Жбанков Г.А.  
Цыбуля К.Г.

ИЗМИРАН, Троицк  
УФУ, Ростов-на Дону



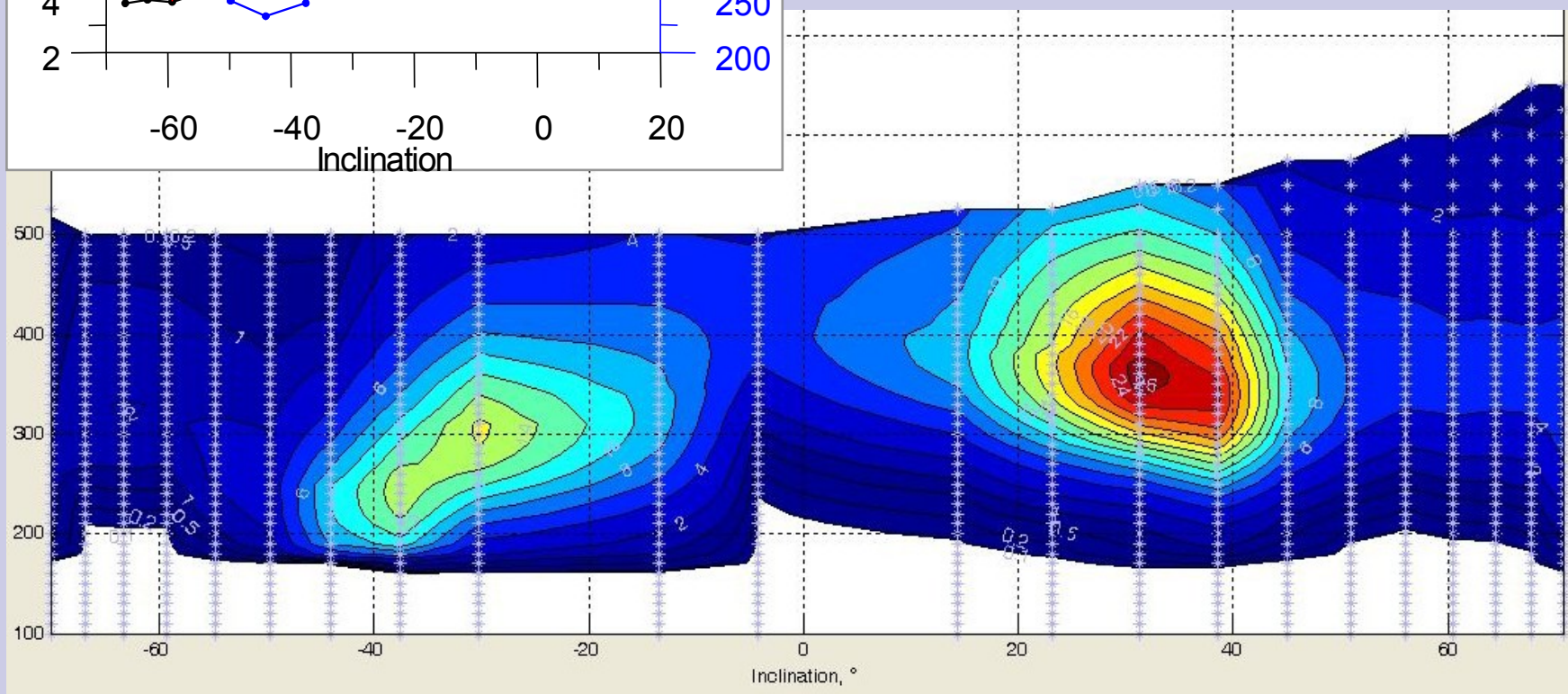
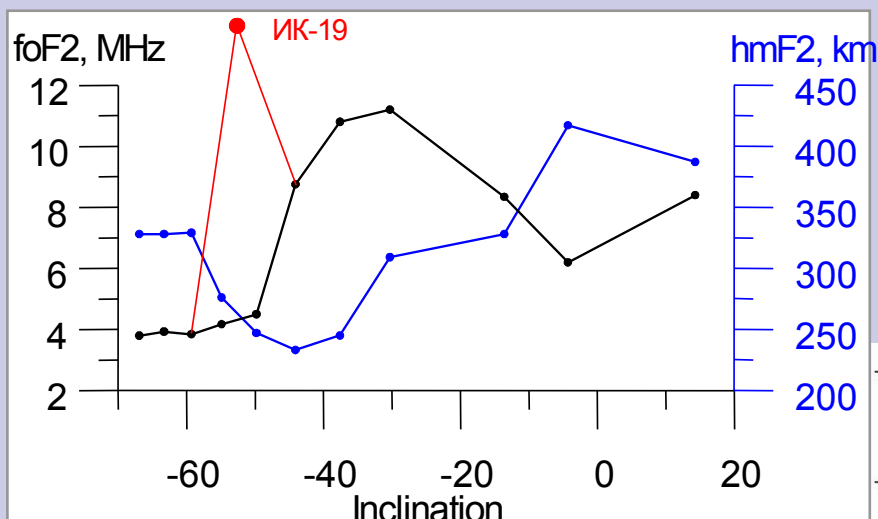
Провал



## Резюме

- *Показано, что сложная ионограмма ИСЗ Интеркосмос-19 формируется наклонным отражением от склона гребня экваториальной аномалии (основной след) и наклонным отражением от основания гребня в результате захвата волны крупномасштабной неоднородностью (дополнительный след).*
- *Для моделирования лучевых траекторий использован метод характеристик.*

# Схема образования множественных следов на ионограмме ИК-19 на внешнем склоне ЭА



## Модель ионосферы

- Широтный разрез ионосферы построен в предположении вертикальных отражений от нижележащей ионосферы, т.е. для случая горизонтально стратифицированной ионосферы. Ясно, что на склоне гребня ЭА с большим градиентом концентрации это условие нарушается и на самом деле мы имеем дело с наклонными отражениями. Поэтому встает задача построения некоего модельного разреза ионосферы, который бы обеспечил распространение радиоволн, сформировавших ионограммы 1-3.
- Фоновая ионосфера. В первом приближении можно пренебречь долготными градиентами и использовать в расчетах двумерное пространственное распределение ионизации.
- Для расчета траекторий необходимо обеспечить непрерывность плазменной частоты и ее производных. Этого можно достичь, используя интерполяцию экспериментальных данных кубическим сплайном.

## Модель ионосферы

- Крупномасштабная неоднородность:

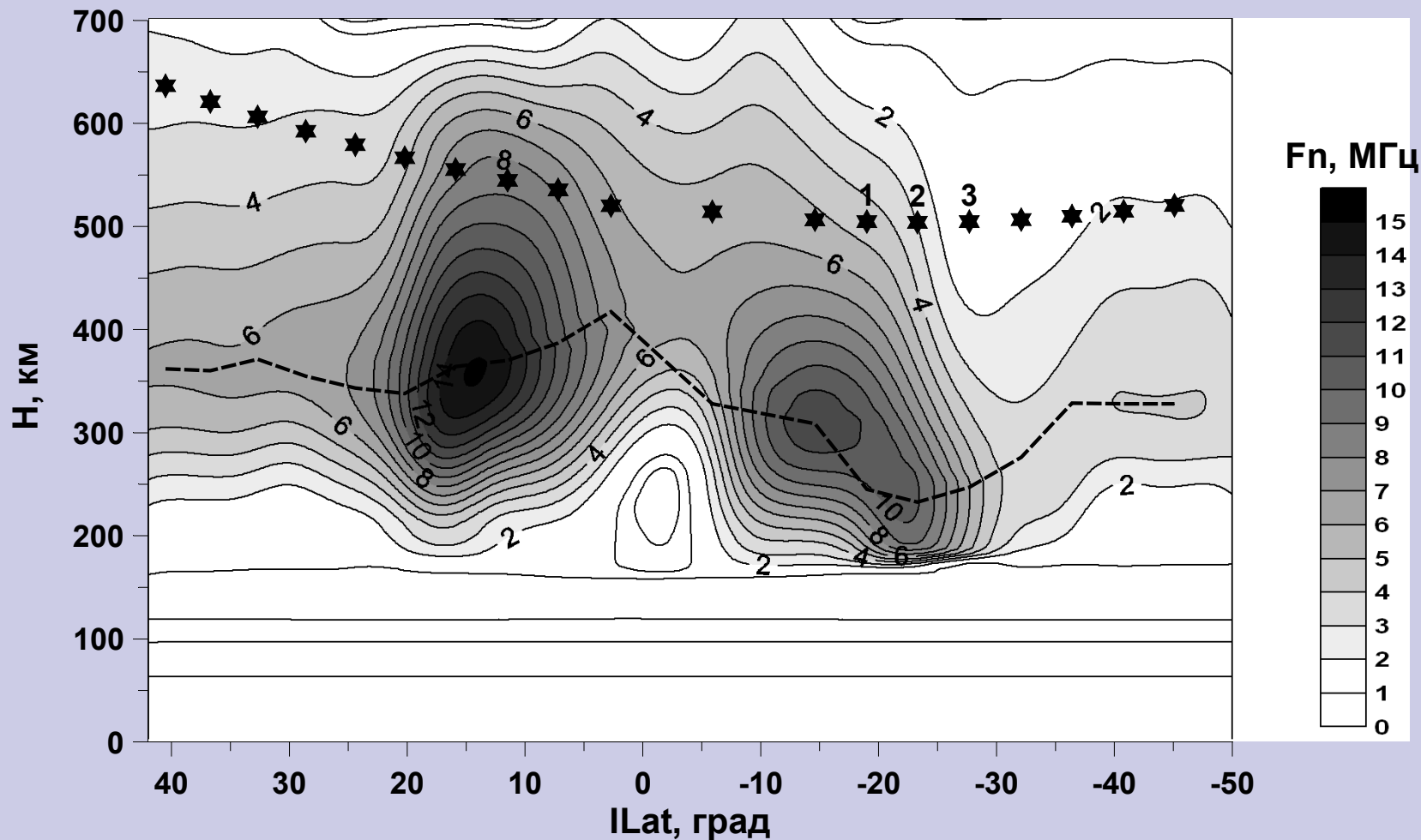
$$\Delta N_1 = \delta \cdot \exp\left(-\left(\frac{x - x_0}{l_x}\right)^2 - \left(\frac{z - z_0}{l_z}\right)^2\right)$$

с амплитудой  $\delta = -0.4$ , центром  $x_0 = 200$  км,  $z_0 = 300$  км, характерными масштабами  $l_x = 20$  км,  $l_z = 250$  км и наклоном  $45^\circ$ . В нее может просачиваться волна, направленная под определенным углом, что и будет определять наличие дополнительного следа, более удаленного, чем основной и с меньшей критической частотой.

- Мелкомасштабные неоднородности.

Диффузный высокочастотный след на ионограмме 2 определяется мелкомасштабными неоднородностями. Не вдаваясь в причины образования таких неоднородностей промоделируем их простой гармонической зависимостью.

# Модельный разрез ионосферы, построенный по данным Интеркосмос-19 и дополненный снизу по модели IRI



## Построение лучевых траекторий

Для расчета лучевых траекторий используется метод характеристик. Локальное дисперсионное уравнение записывается в виде [4,5]:

$$F(t, \mathbf{x}, \mathbf{k}, \omega) = k^2 - k_0^2 \cdot n^2(t, \omega, \mathbf{x}, \mathbf{k}, \mathbf{H}),$$

Для решения уравнения эйконала применяется метод характеристик Гамильтона. В общем случае криволинейных координат система характеристических уравнений, позволяющая учесть анизотропию, неоднородность и нестационарность ионосферной плазмы, имеет вид:

$$\frac{d\varphi}{d\tau} = \frac{1}{r \cdot \sin \theta} \left\{ k_\varphi - \frac{1}{2} \frac{\partial \mu^2}{\partial k_\varphi} \right\};$$

$$\frac{d\theta}{d\tau} = \frac{1}{r} \left\{ k_\theta - \frac{1}{2} \frac{\partial \mu^2}{\partial k_\theta} \right\};$$

$$\frac{dr}{d\tau} = k_r - \frac{1}{2} \frac{\partial \mu^2}{\partial k_r};$$



$$\frac{dk_\varphi}{d\tau} = \frac{1}{r \cdot \sin\theta} \left\{ \frac{1}{2} \frac{\partial \mu^2}{\partial \varphi} - k_\varphi \sin\theta \frac{dr}{d\tau} - rk_\varphi \cos\theta \frac{d\theta}{d\tau} \right\};$$

$$\frac{dk_\theta}{d\tau} = \frac{1}{r} \left\{ \frac{1}{2} \frac{\partial \mu^2}{\partial \theta} - k_\theta \frac{dr}{d\tau} + rk_\varphi \cos\theta \frac{d\varphi}{d\tau} \right\};$$

$$\frac{dk_r}{d\tau} = \frac{1}{2} \frac{\partial \mu^2}{\partial r} + k_\theta \frac{d\theta}{d\tau} + k_\varphi \sin\theta \frac{d\varphi}{d\tau}.$$

Здесь  $\Delta$  и  $\alpha$  – лучевые координаты (угол места и азимут соответственно),  $(k_r, k_\theta, k_\varphi)$  – физические полярные компоненты волнового вектора  $\mathbf{k}$ ;  $f, f_n$  – рабочая и плазменные частоты, соответственно.

Начальные условия для системы (1) в точке с координатами  $(\varphi_0, \theta_0, R_0)$ :

$$\varphi = \varphi_0; \quad \theta = \theta_0; \quad r = R_0; \tag{2}$$

$$k_\varphi = \cos\Delta_0 \sin\alpha_0; \quad k_\theta = -\cos\Delta_0 \cos\alpha_0; \quad k_r = \sin\Delta_0;$$

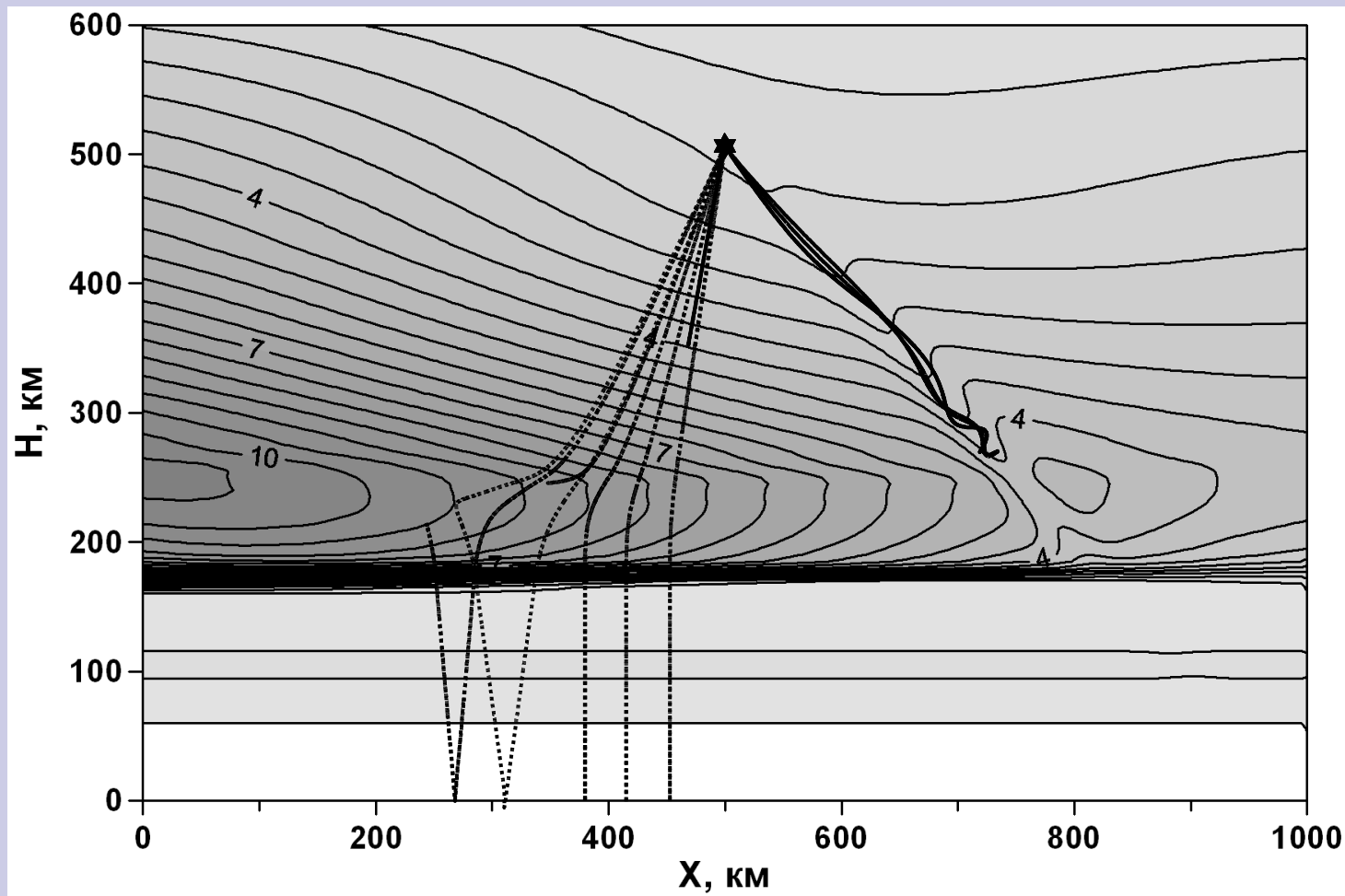
Для решения системы (1), применяется метод Рунге-Кутты-Фельберга пятого порядка с переменным шагом.

Для каждой компоненты решается граничная задача:

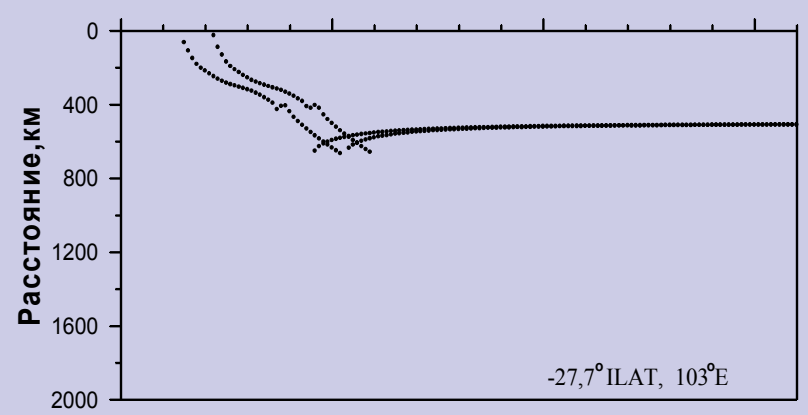
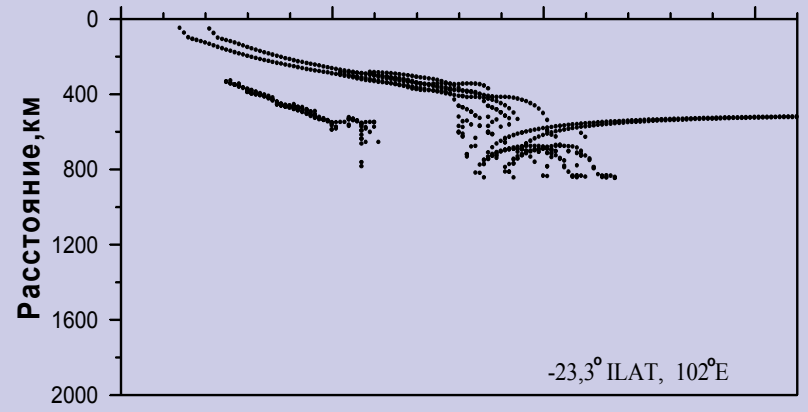
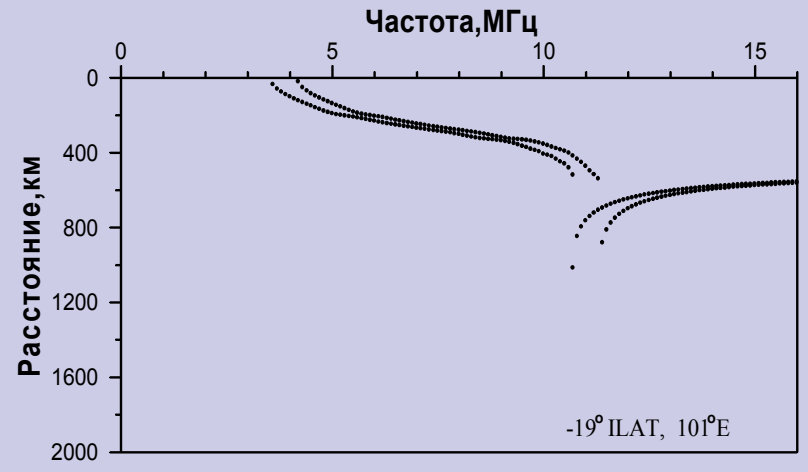
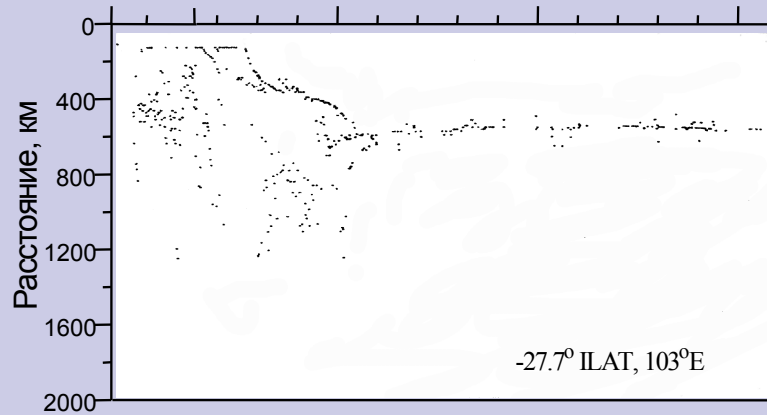
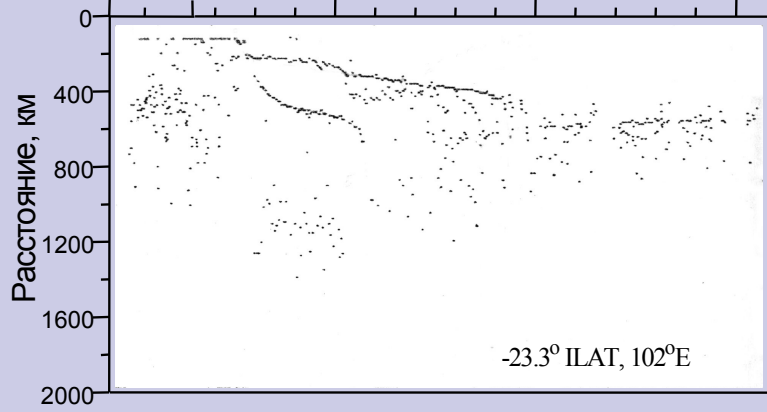
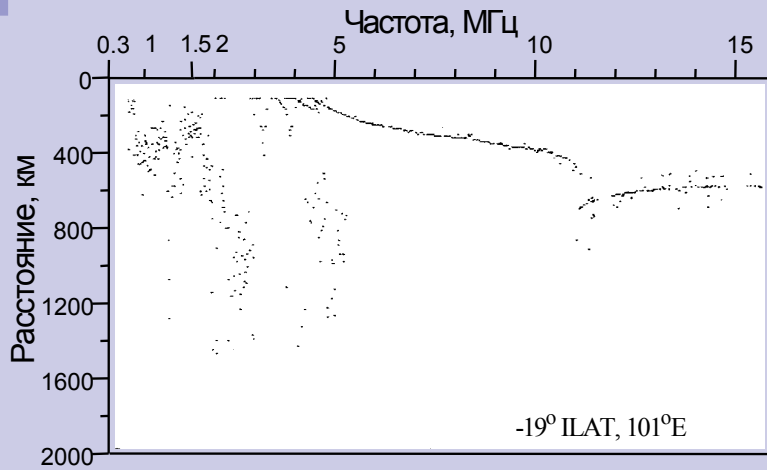
$$D(f, \Delta_0) = 0 \tag{3}$$

где  $D(f, \Delta_0)$  — длина дуги с  $R = R_{sat}$  как функция угла места  $\Delta_0$  и рабочей частоты  $f$ , т.е. расстояние от спутника до точки пересечения траектории с его орбитой. Решение находится при помощи комбинации методов бисекции и секущих.

# Траектории радиоволн, формирующей сложную ионограмму



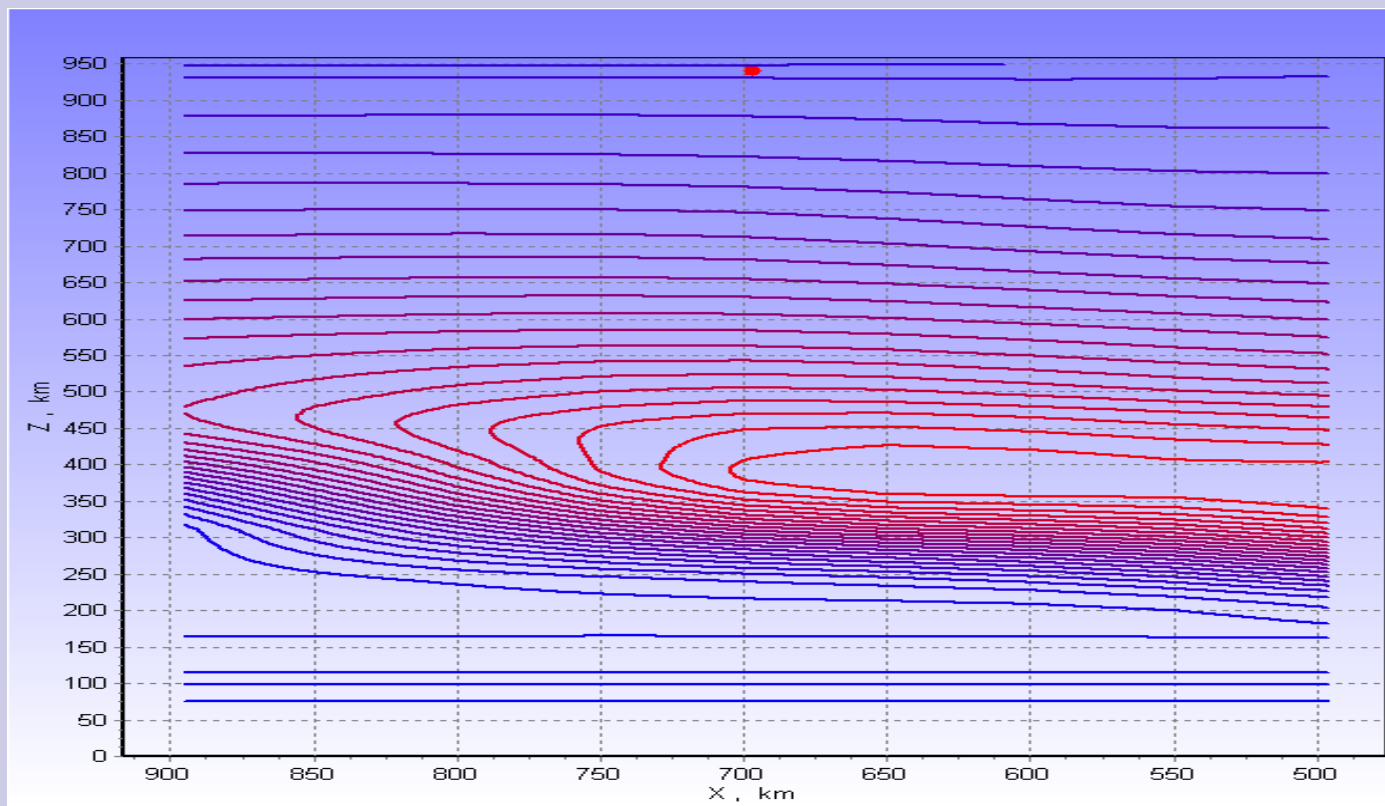
# Результаты расчетов

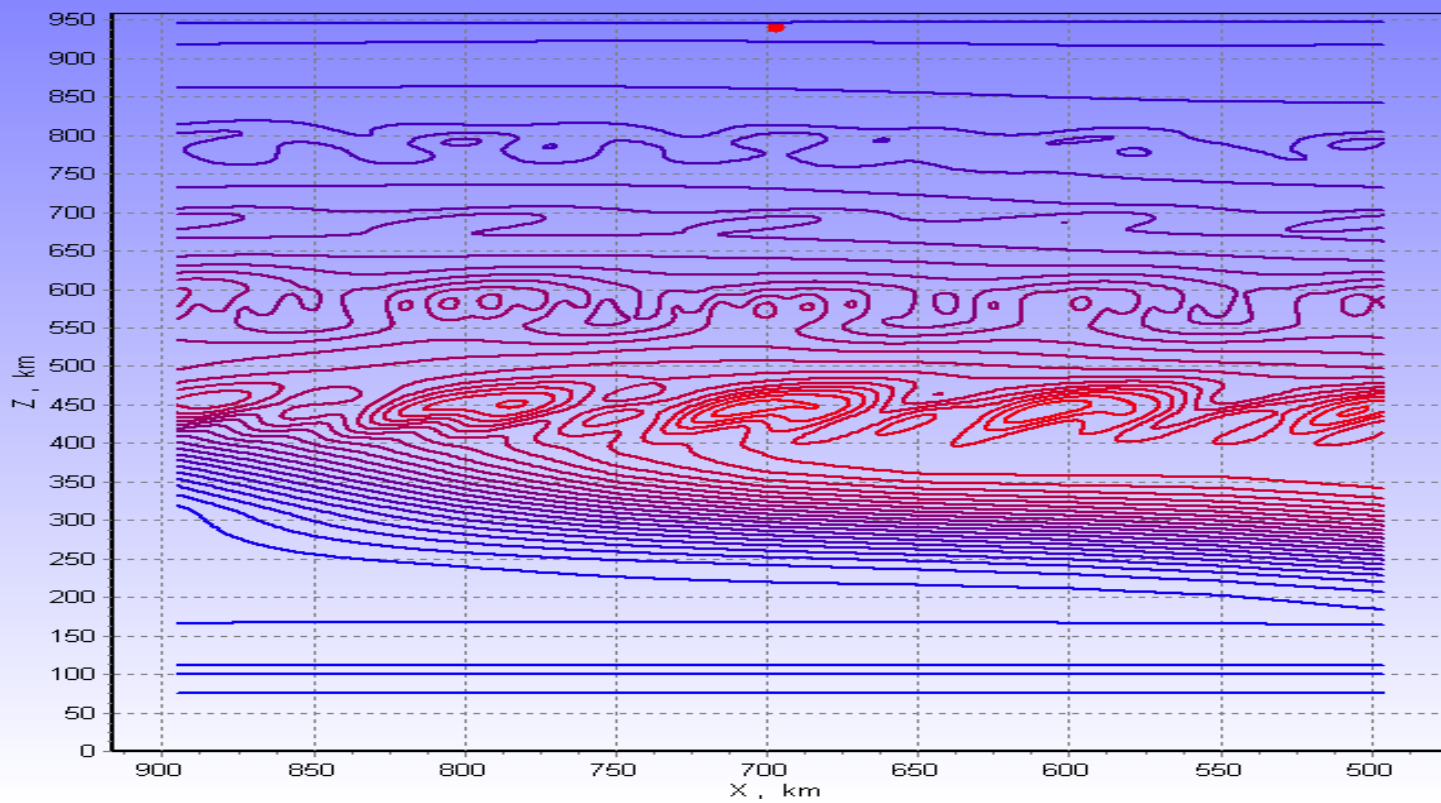


## Выводы

- Траекторные расчеты по методу характеристик на основе построенной модели ионосферы позволили объяснить формирование сложной ионограммы спутника Интеркосмос-19
- Сложная ионограмма Интеркосмос-19 была обусловлена специфической структурой ионосферы в области внешнего склона зимнего южного гребня экваториальной аномалии
- Интересная ионосфера – интересная ионограмма









1981 04 09 02 08 51 МОСКВА 750

