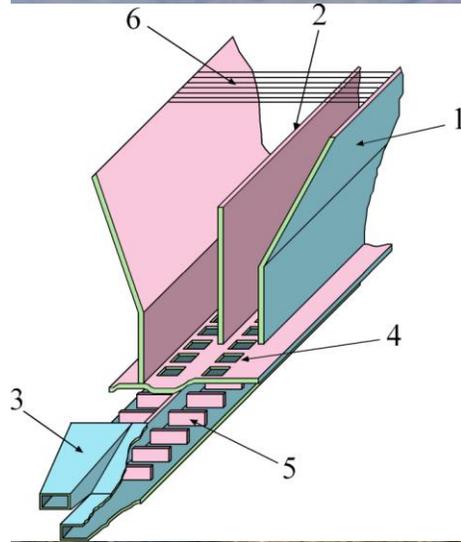


An aerial photograph of a large scientific facility, likely a radio telescope or radar station. The facility consists of a long, dark, segmented antenna array extending into the distance, and several large, light-colored buildings with flat roofs. The surrounding area is a mix of forested land and open fields with patches of snow. The text is overlaid in a large, yellow, serif font.

# Моделирование радиолокационного сигнала в УКВ диапазоне с учётом эффектов распространения в тропосфере и ионосфере

*В.А. Ивонин, В.П. Лебедев — Институт солнечно-земной физики  
Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия*

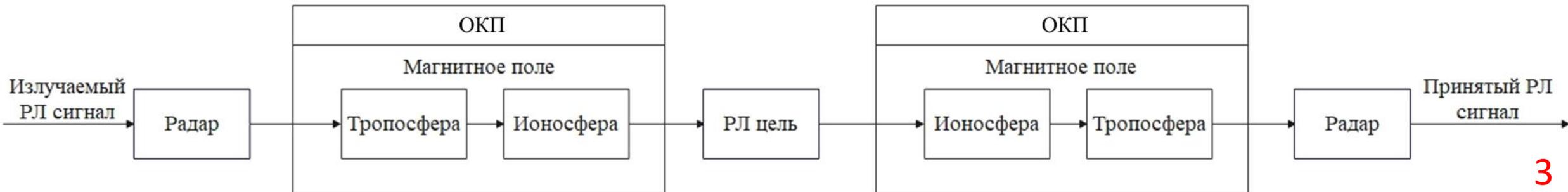
# Иркутский радар некогерентного рассеяния ИСЗФ СО РАН (52,88° с.ш. , 103.26° в.д.)



Рабочие частоты	154 - 162 МГц
Импульсная мощность	2,5 – 3,2 МВт
Длительность импульсов	70 - 820 мкс
Частота повторения импульсов	24,4 Гц
Коэффициент усиления антенны	38 дБ
Шумовая температура системы	300 К
Антенна	секториальный рупор
Размер диаграммы напр.	0,5° (С-Ю), 10° (В-З)
Диапазон сканирования	±30° (С-Ю)

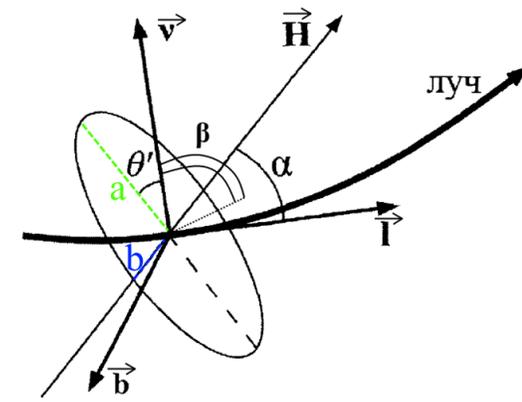
- Основные задачи:**
- исследования верхней атмосферы,
  - контроль КА и космического мусора,
  - активные космические эксперименты

# Блок-схема программного комплекса



# Блок расчёта поляризации

$$(1) \quad \Delta\theta = \theta' + i\theta'' = \underbrace{\Omega}_{\text{Фарадей}} + \underbrace{\chi_{Re} + i\chi_{Im}}_{\text{Коттон-Мутон}}, \quad \theta'' = \operatorname{arcth}\left(\frac{b}{a}\right)$$



$$(2) \quad \begin{cases} \Omega(s) = \theta_0 + \frac{\omega}{2c} \int_0^s v(s') \sqrt{u(s')} \cos(\alpha(s')) ds' \\ \frac{d\chi_{Re}}{ds} = \frac{\omega}{4c} v(s) u(s) \sin^2(\alpha(s)) \cos\left(2(\beta(s) + \Omega(s) + \chi_{Re}(s))\right) \sinh(2\chi_{Im}(s)) , \\ \frac{d\chi_{Im}}{ds} = -\frac{\omega}{4c} v(s) u(s) \sin^2(\alpha(s)) \sin\left(2(\beta(s) + \Omega(s) + \chi_{Re}(s))\right) \cosh(2\chi_{Im}(s)) \end{cases}$$

где  $ds$  — элемент длины дуги вдоль траектории луча радиоволны,  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  — частота радиоволны,  $c$  — скорость света в вакууме,  $v = \frac{f_{\text{пл}}^2(N_e)}{f^2}$ ,  $N_e$  — электронная концентрация ионосферы,  $f_{\text{пл}} = \frac{q_e}{2\pi} \sqrt{\frac{N_e}{\epsilon_0 m_e}}$  — плазменная частота ионосферы,  $q_e$  — заряд электрона,  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная,  $m_e$  — масса электрона,  $\sqrt{u} = \frac{\omega_H}{\omega} = \frac{q_e \mu_0 |\vec{H}|}{m_e \omega}$ ,  $\omega_H$  — гирочастота,  $\mu_0$  — магнитная постоянная,  $\vec{H}$  — напряжённость геомагнитного поля,  $\alpha$  — угол между лучом радиоволны и  $\vec{N}$ ,  $\beta$  — угол между главной нормалью к лучу и плоскостью, образованной  $\vec{N}$  и единичным вектором касательной к лучу

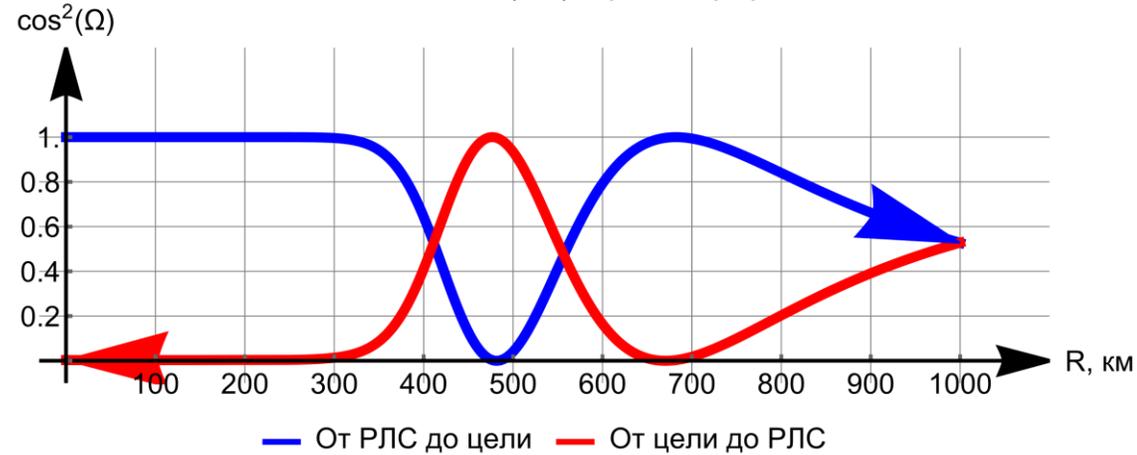
# Моделирование эффекта Фарадея

Изменение поляризационного фактора мощности принимаемого сигнала

в процессе распространения до КО и обратно

03.03.2021, 13:00 UT, ИРНР,  $f_0=158$  МГц,  $el=40^\circ$ ,  $az=263^\circ$

IRI, IGRF-13(IRI), тропосфера



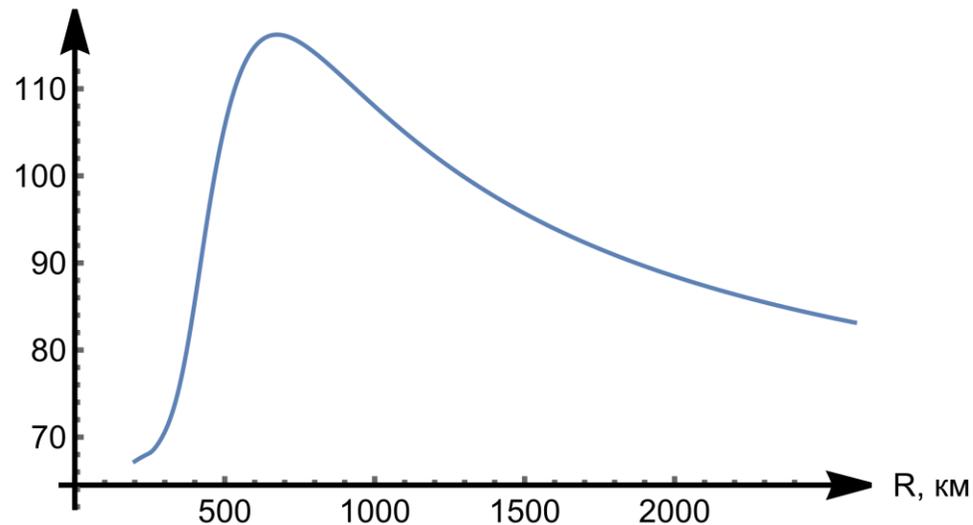
$P_0=954,586$  гПа

$T_0=288,15$  К

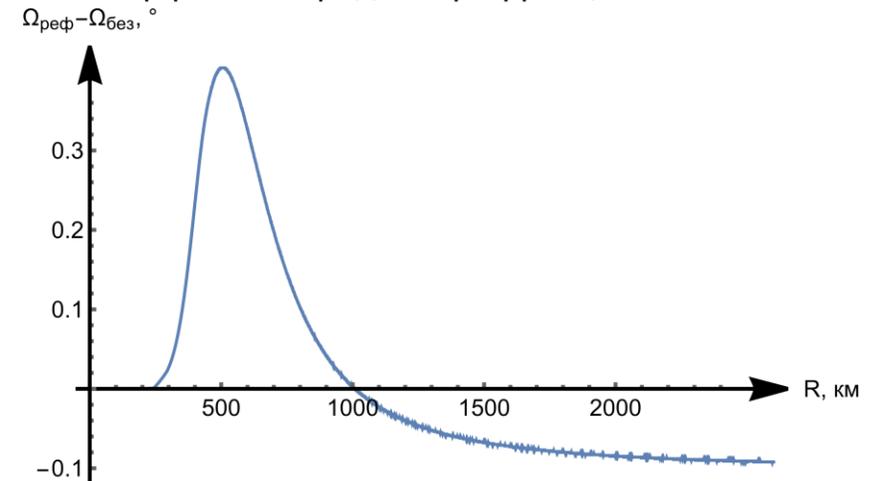
$e_0=11,9657$  гПа

## Угол рефракции

Угол рефракции, угловые секунды



Разница в расчётах угла поворота эллипса поляризации вследствие эффекта Фарадея с рефракцией и без



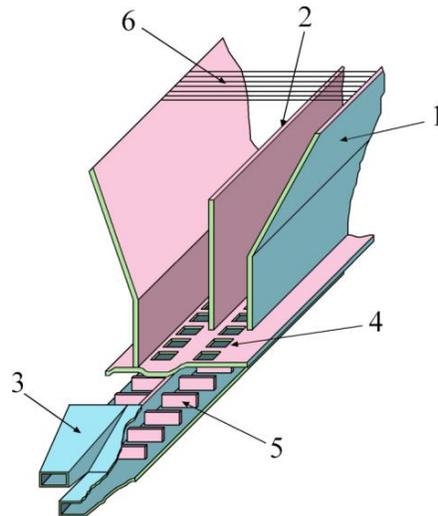
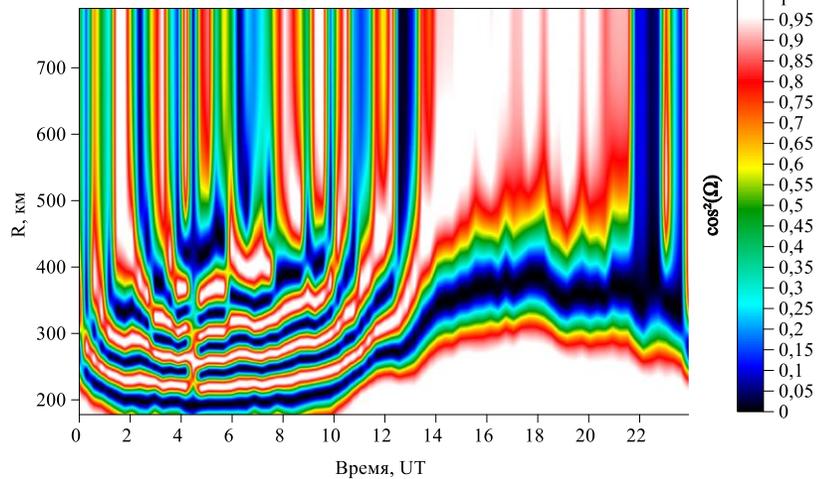
# Модель мощности принятого сигнала

$$\text{Отражённого от КО: } P_{\text{пр}} = \underbrace{\frac{P_{\text{изл}} G_0 F_{\text{изл}}(\varepsilon, \gamma)}{4\pi R^2}}_{\text{Излучение}} \cdot \underbrace{\frac{\sigma}{4\pi R^2}}_{\text{Отражение}} \cdot \underbrace{\frac{\lambda^2 G_0 F_{\text{пр}}(\varepsilon, \gamma)}{4\pi} \cos^2(\Omega(R))}_{\text{Приём}}$$

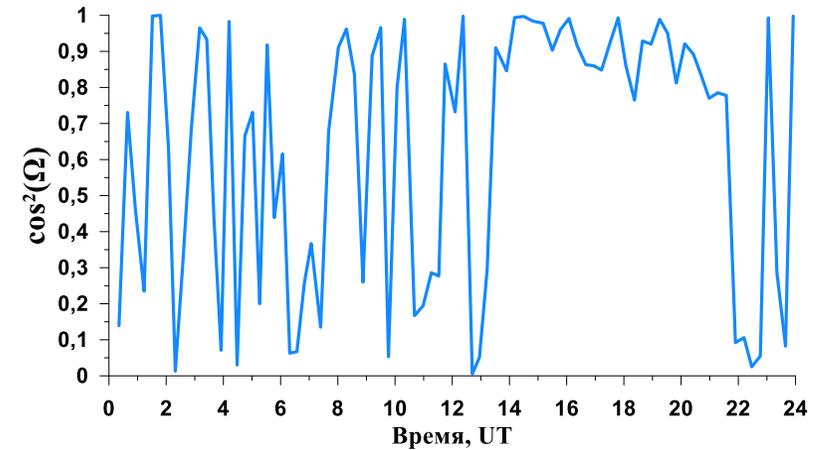
$$\text{Некогерентного рассеяния: } P_{\text{НР}} = \frac{P_{\text{изл}} G_0^2 \lambda^2 c \tau_i \pi r_e^2}{2R^2 (4\pi)^3} \left( \frac{N_e(R)}{1 + \frac{T_e(R)}{T_i(R)}} \right) \cos^2(\Omega(R)) \iint F_{\text{изл}}(\varepsilon, \gamma) F_{\text{пр}}(\varepsilon, \gamma) \cos(\varepsilon) d\gamma d\varepsilon$$

$P_{\text{изл}}$  — мощность излучения,  $G_0$  — максимальный КУ,  $F_{\text{изл,пр}}(\varepsilon, \gamma)$  — нормированная на 1 ДН соответственно на излучение или приём,  $\varepsilon$  — азимут,  $\gamma$  — угол места,  $R$  — дальность,  $\sigma$  — ЭПР КО,  $\lambda$  — длина волны,  $\tau_i$  — длительность импульса,  $r_e$  — радиус электрона,  $T_{e,i}$  — соответственно электронная или ионная температура

Получено на ИРНР 01.03.2022  
 $f_0 = 155\,300$  кГц



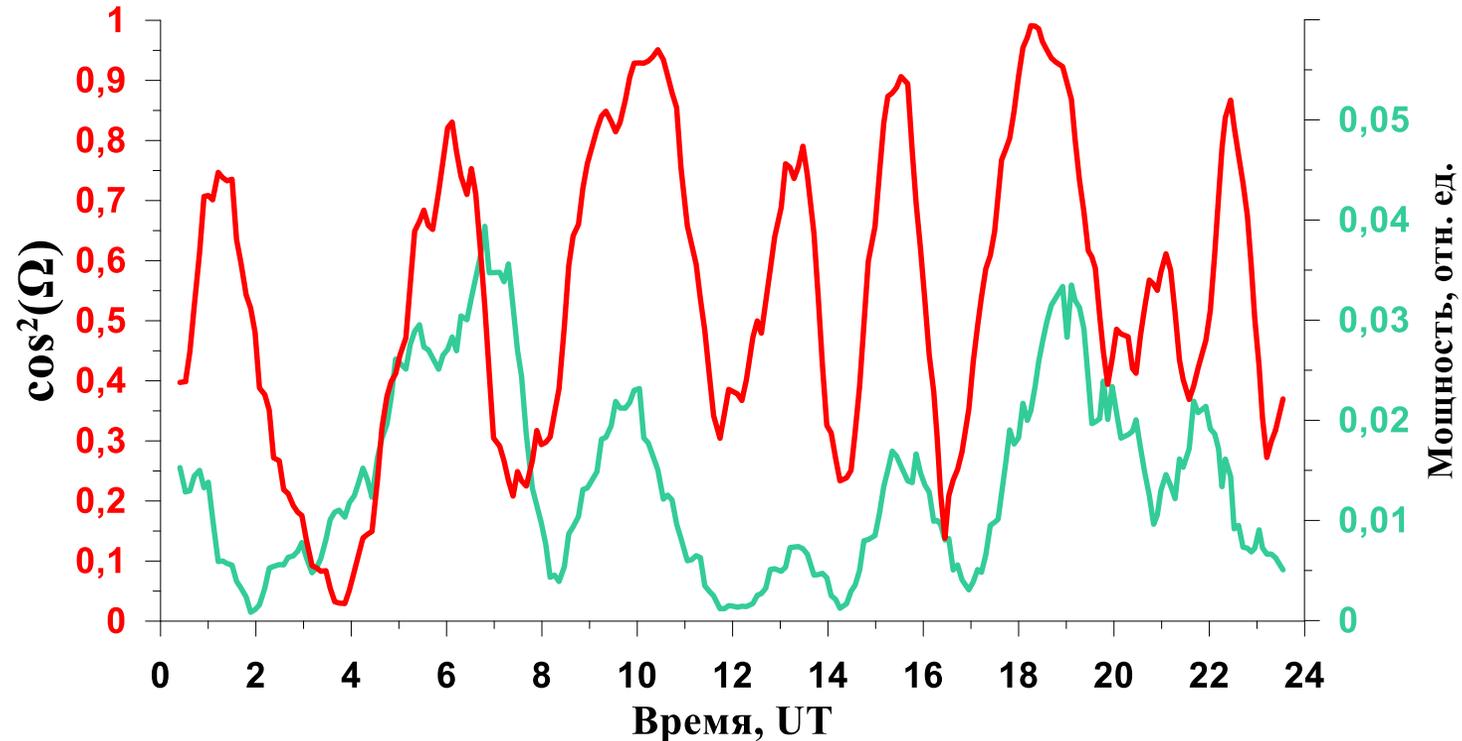
Получено на ИРНР 01.03.2022  
 $f_0 = 155\,300$  кГц,  $R = 550$  км



# Динамика измеренной мощности сигнала от КА «Starlink» на ИРНР

## КА «Starlink» на ИРНР

02.09.2022



Зелёная линия — динамика измеренной мощности сигнала от КА «Starlink» на ИРНР  
Красная линия — восстановленный по профилю электронной концентрации  $\cos^2(\Omega)$

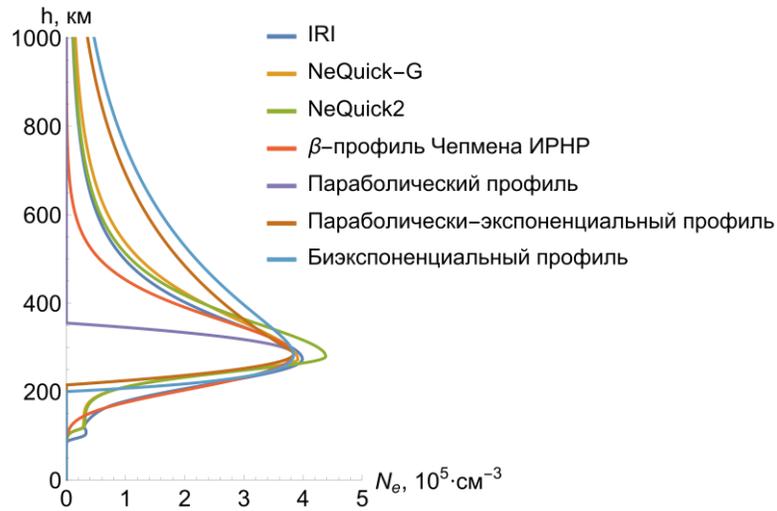
# Заключение

- Разработан программный комплекс для моделирования распространения радиоволн УКВ диапазона в тропосфере и ионосфере Земли
- Описан способ расчёта эффектов Фарадея и Коттона-Мутона
- Произведено сравнение результатов моделирования эффекта Фарадея с его расчётом на ИРНР
- Продемонстрированы результаты расчётов эффекта Фарадея для Иркутского радара некогерентного рассеяния на примере плотных измерений КА «Starlink»

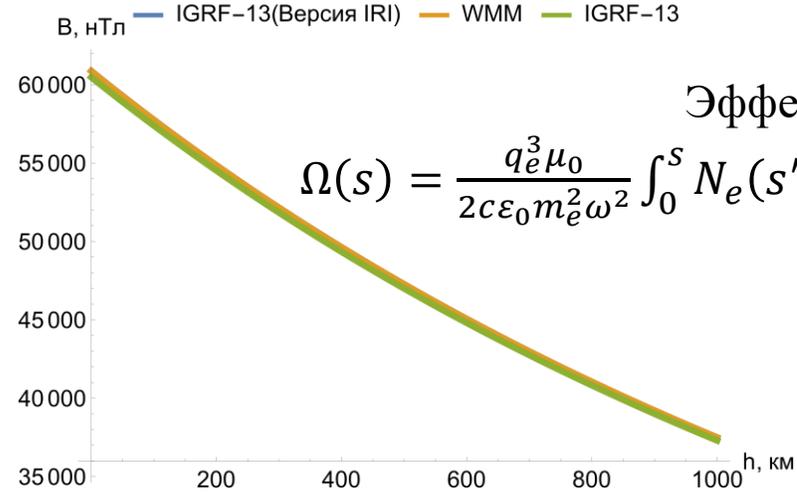
**Спасибо за внимание!**

# Эффект Фарадея

Сравнение моделей профилей  
электронной концентрации ионосферы  
52,8811° С.Ш., 103,256° В.Д. (ИРНР)  
24.05.2021 12:30 UT

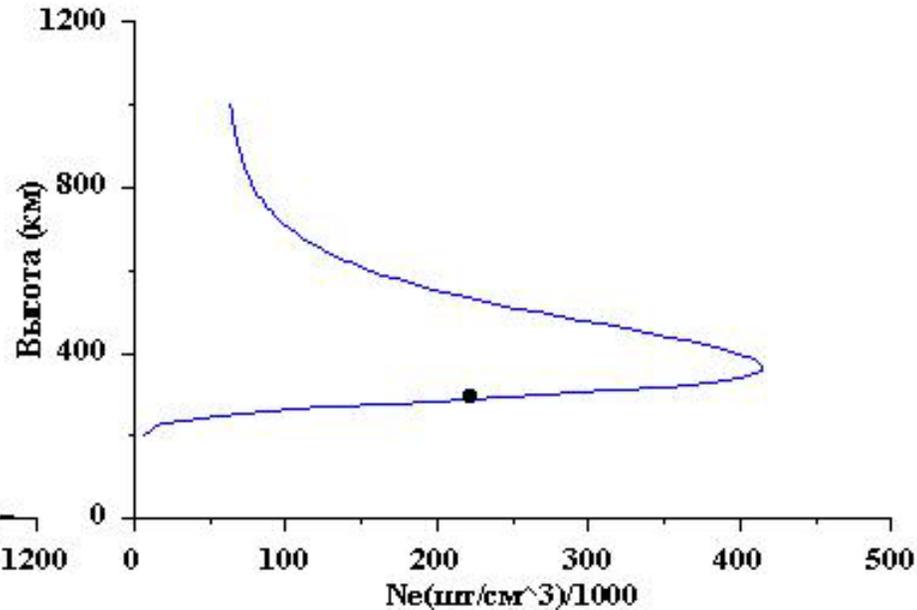
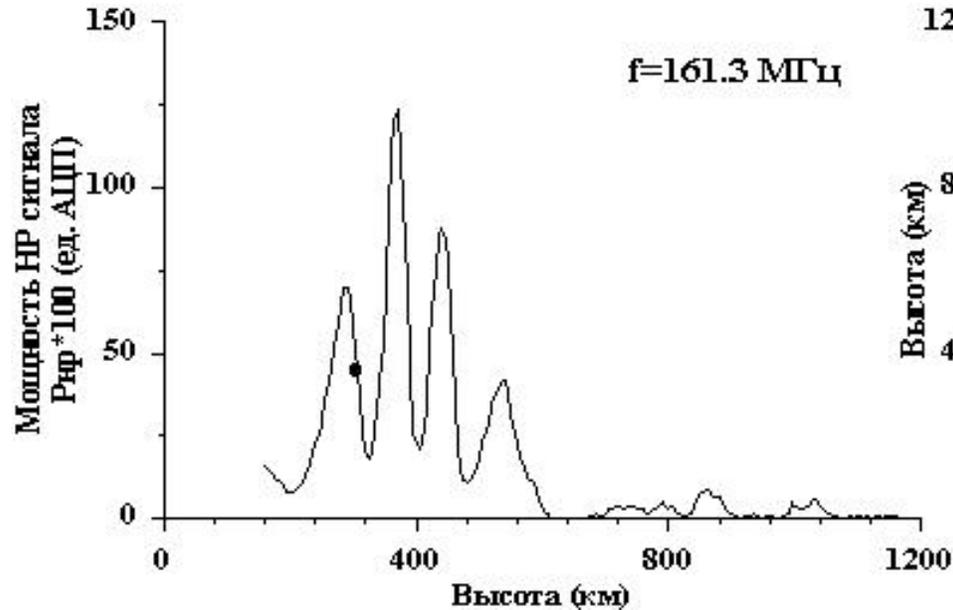


Сравнение моделей геомагнитного поля  
52,8811° С.Ш., 103,256° В.Д. (ИРНР)  
24.05.2021 12:30 UT



Эффект Фарадея:

$$\Omega(s) = \frac{q_e^3 \mu_0}{2c \epsilon_0 m_e^2 \omega^2} \int_0^s N_e(s') |\vec{H}(s')| \cos(\alpha(s')) ds', \quad (5)$$



Измеренный профиль  
мощности HF сигнала (слева)  
и восстановленный профиль  
электронной концентрации  
(справа).

Точка — высота пролёта  
наблюдаемого КО