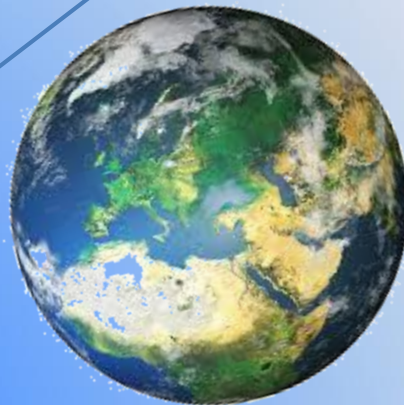
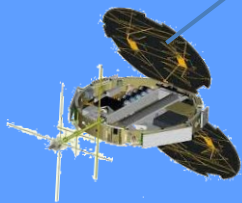


Оценка эффективности выявления возмущений в ионосфере при обработке данных радиопросвечивания с использованием инварианта радиопросвечивания

Гаврик А.Л., Луканина Л.А., Копнина Т.Ф.

(alg248@hotmail.com)

ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

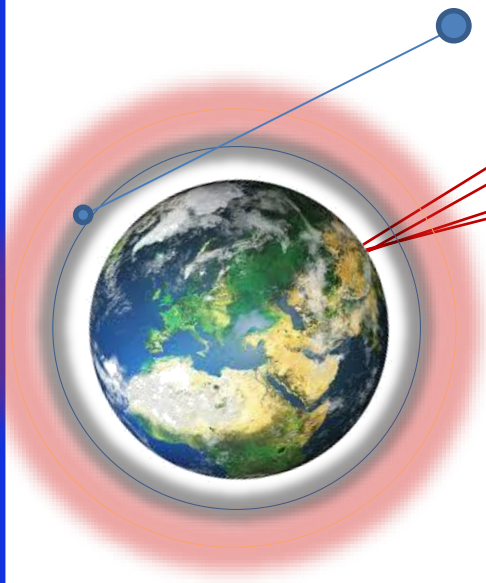


Двадцать третья международная конференция
"СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА"
ИКИ РАН Москва. 12 ноября 2025 г.

Схема радиопросвечивания ионосферы

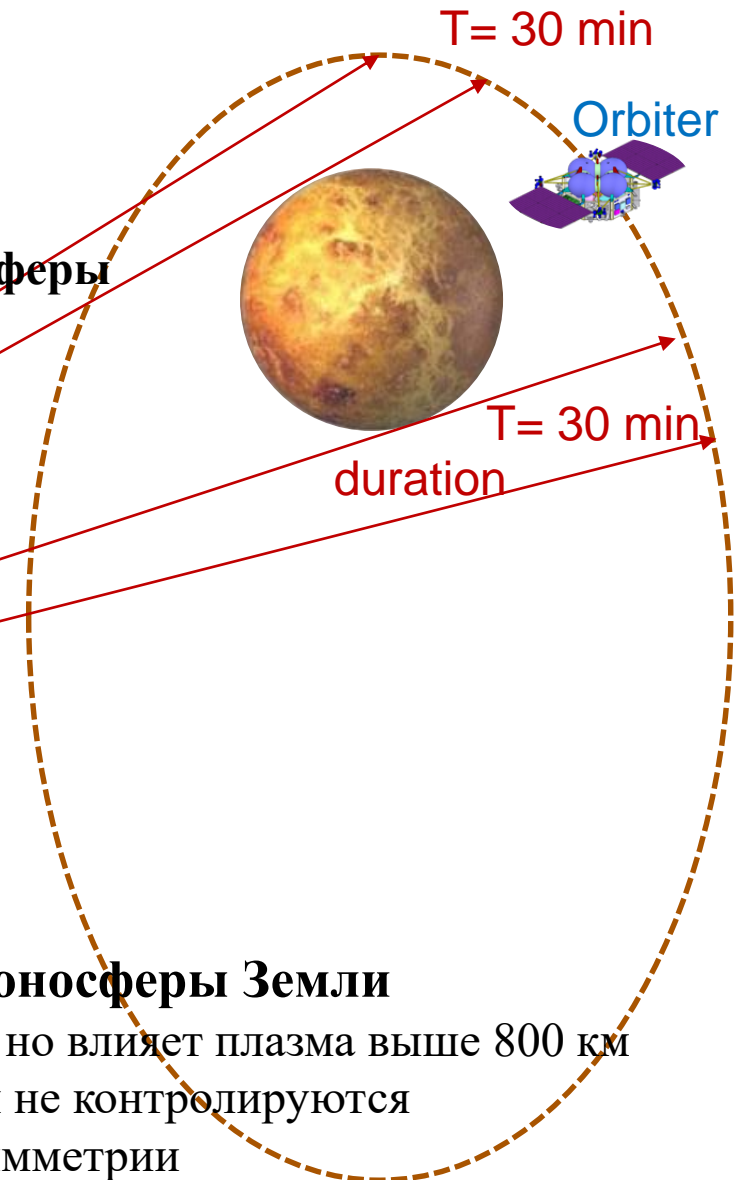
Мешающие факторы

- Нестабильность бортового генератора сигналов
- Неточность прогноза траектории
- Выделение влияния плазмы на фоне влияния атмосферы
- Флуктуации плазмы на трассе связи за пределами ионосферы
- Шумы аппаратуры
- Точность определения параметров сигналов
- Точность определения профиля
- Влияние несферичности ионосферы

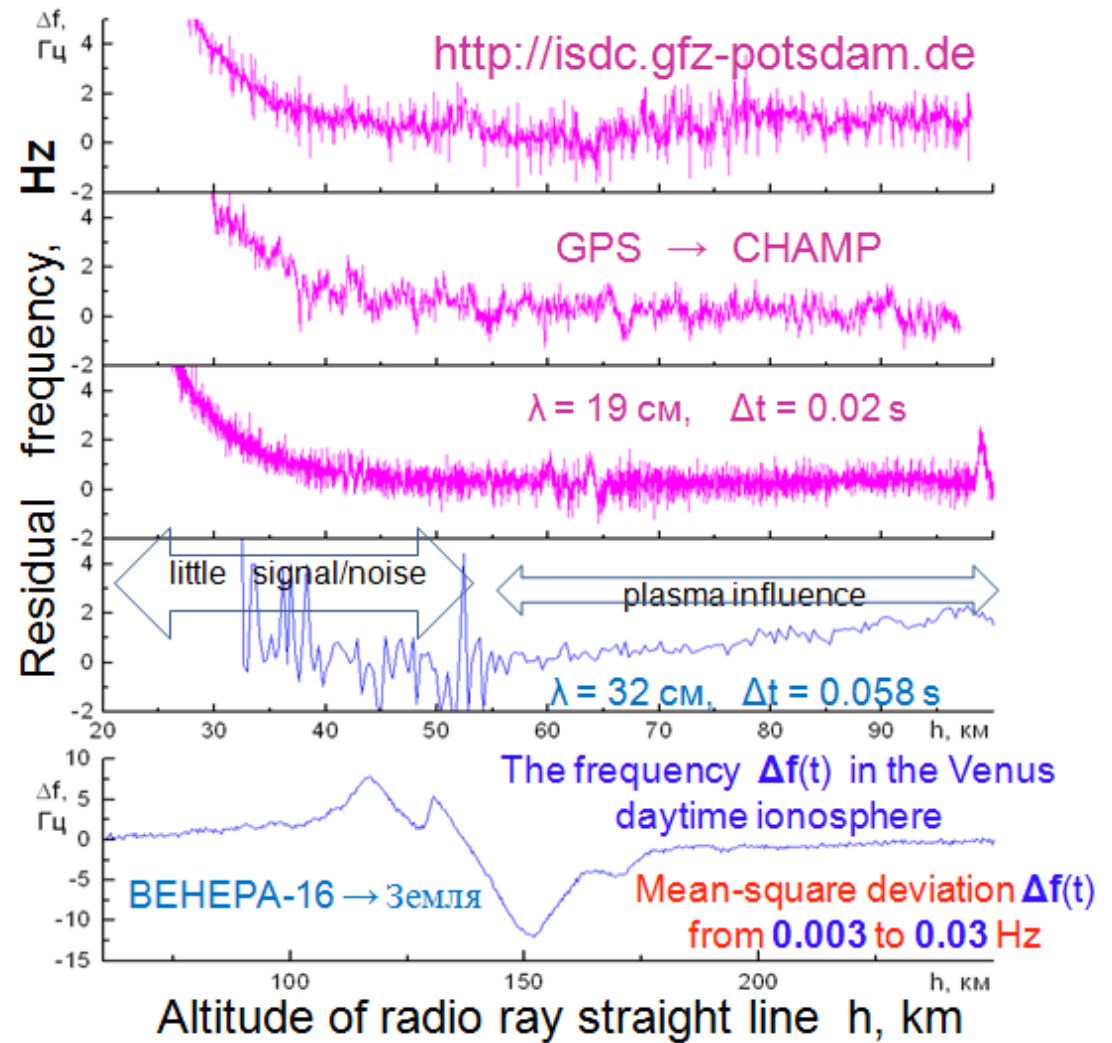
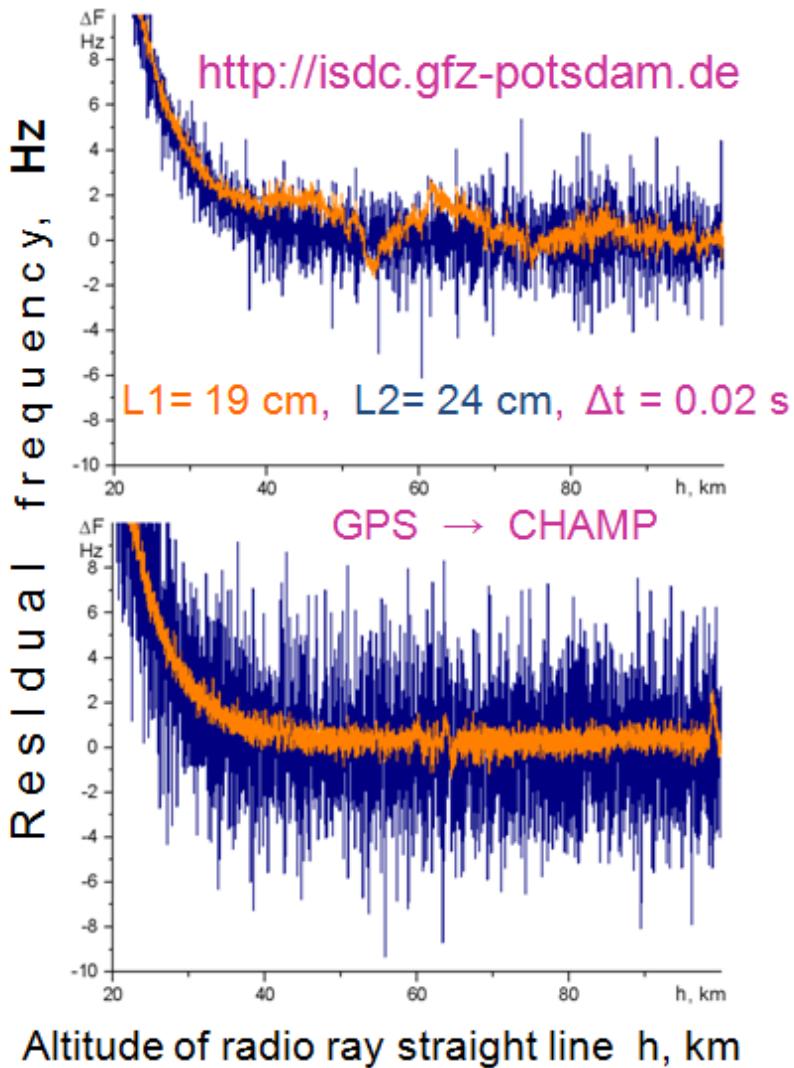


При радиопросвечивании ионосферы Земли

- Межпланетная плазма не влияет, но влияет плазма выше 800 км
- флуктуации плазмы выше 800 км не контролируются
- Нет достоверной сферической симметрии
- Флуктуации частоты выше, чем при просвечивании Венеры



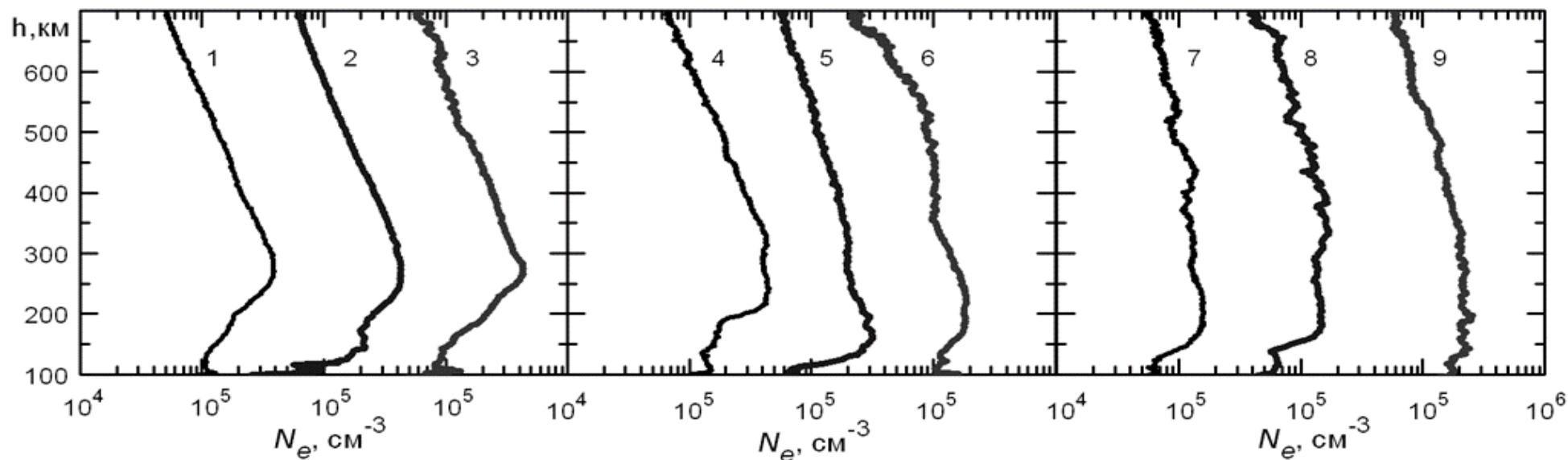
Сравнение флуктуаций частоты радиоволны



Высотные профили электронной концентрации

324 сеанса

48 сеансов



| № п/п | DOY | h_{max} , км | $N_{e \text{ max}}$, cm^{-3} | H, км | ϕ , град. | λ , град. | Z_O , град. |
|-------|---------|-----------------------|--|-------|----------------|-------------------|---------------|
| 1 | 170.806 | 269 | 393769 | 212 | 83 | 26 | 66 |
| 2 | 171.298 | 273 | 432552 | 200 | 83 | -105 | 62 |
| 3 | 171.064 | 266 | 434692 | 214 | 80 | -36 | 70 |
| 4 | 172.115 | 242 | 451821 | 203 | 82 | -54 | 66 |
| 5 | 178.209 | 200 | 278350 | 282 | 88 | 6 | 67 |
| 6 | 174.076 | 218 | 187835 | 322 | 88 | -42 | 67 |
| 7 | 174.427 | 219 | 160757 | 628 | 87 | -33 | 64 |
| 8 | 174.567 | 337 | 170823 | 266 | 82 | -166 | 74 |
| 9 | 176.249 | 203 | 236185 | 263 | 84 | 32 | 69 |

Свойство сферической слоистой среды при зондировании

При радиопросвечивании прозрачной газовой оболочки планеты, стратифицированной полем тяжести, изменение плотности потока энергии прямо пропорционально градиенту угла отклонения волнового вектора ξ от первоначального направления, если применима геометрическая оптика.

$$\frac{P(t) - P_0}{P_0} = L \frac{d}{dt} \xi(t)$$

Поэтому зарегистрированные в эксперименте вариации мощности радиоволны $P(t)$ прямо пропорциональны скорости изменения ее частоты $f(t)$.

$$\frac{P(t) - P_0}{P_0} = \frac{\lambda \cdot L}{V_{\perp}^2} \cdot \frac{d}{dt} f(t)$$

Следовательно, при отсутствии мешающих факторов существует инвариант радиозатменного эксперимента.

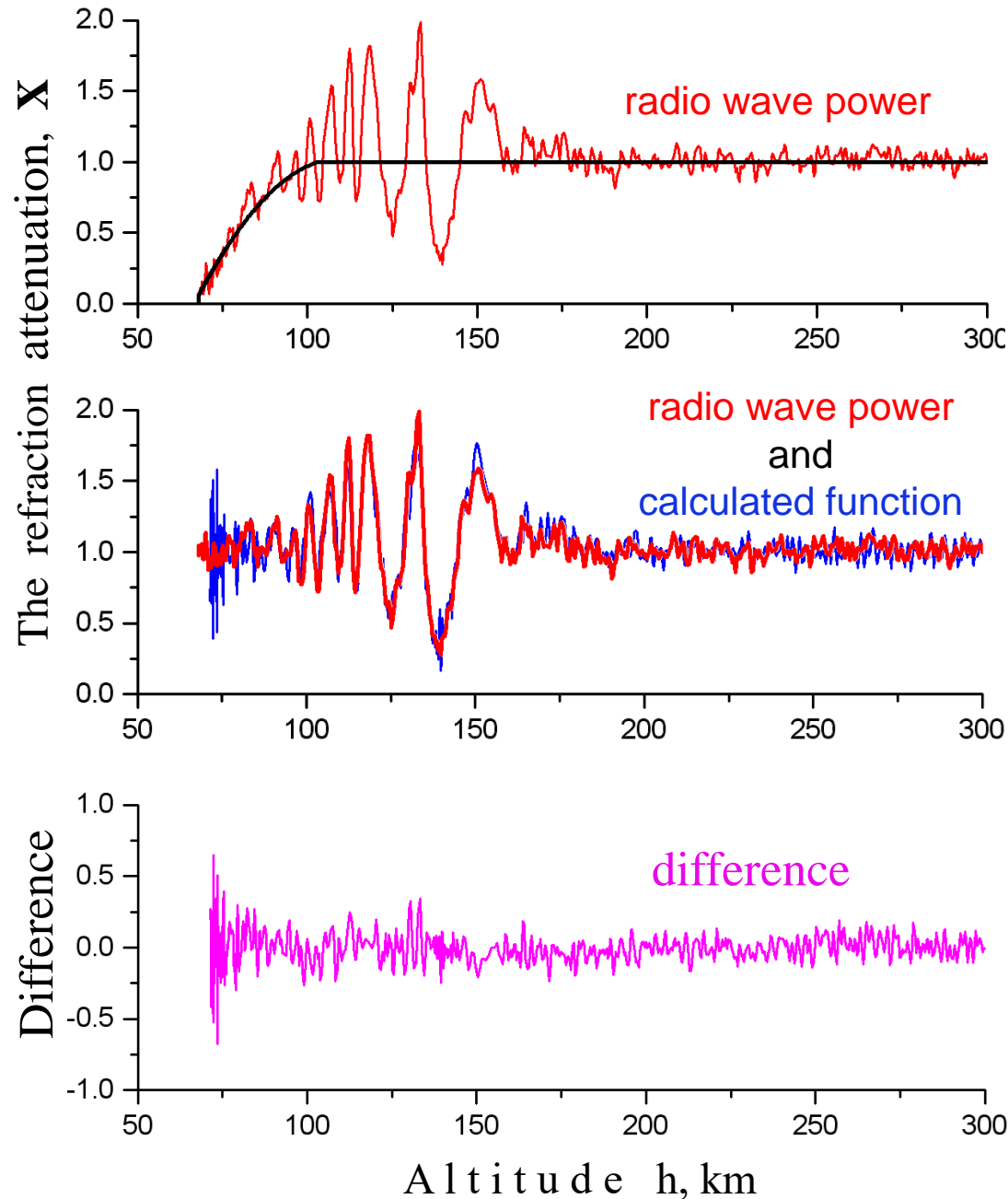
$$\Delta E / \Delta \omega = \text{const}$$

Обозначения:

ΔE – изменение энергии, $\Delta \omega$ – изменение частоты на произвольном, достаточно малом интервале времени τ в процессе радиопросвечивания ионосферы и атмосферы планеты.

$P(t)$ – мощность, $f(t)$ – частота радиоволны λ ,
 L – прицельный параметр луча, V – скорость захода спутника.

The most interesting session is illustrated here.



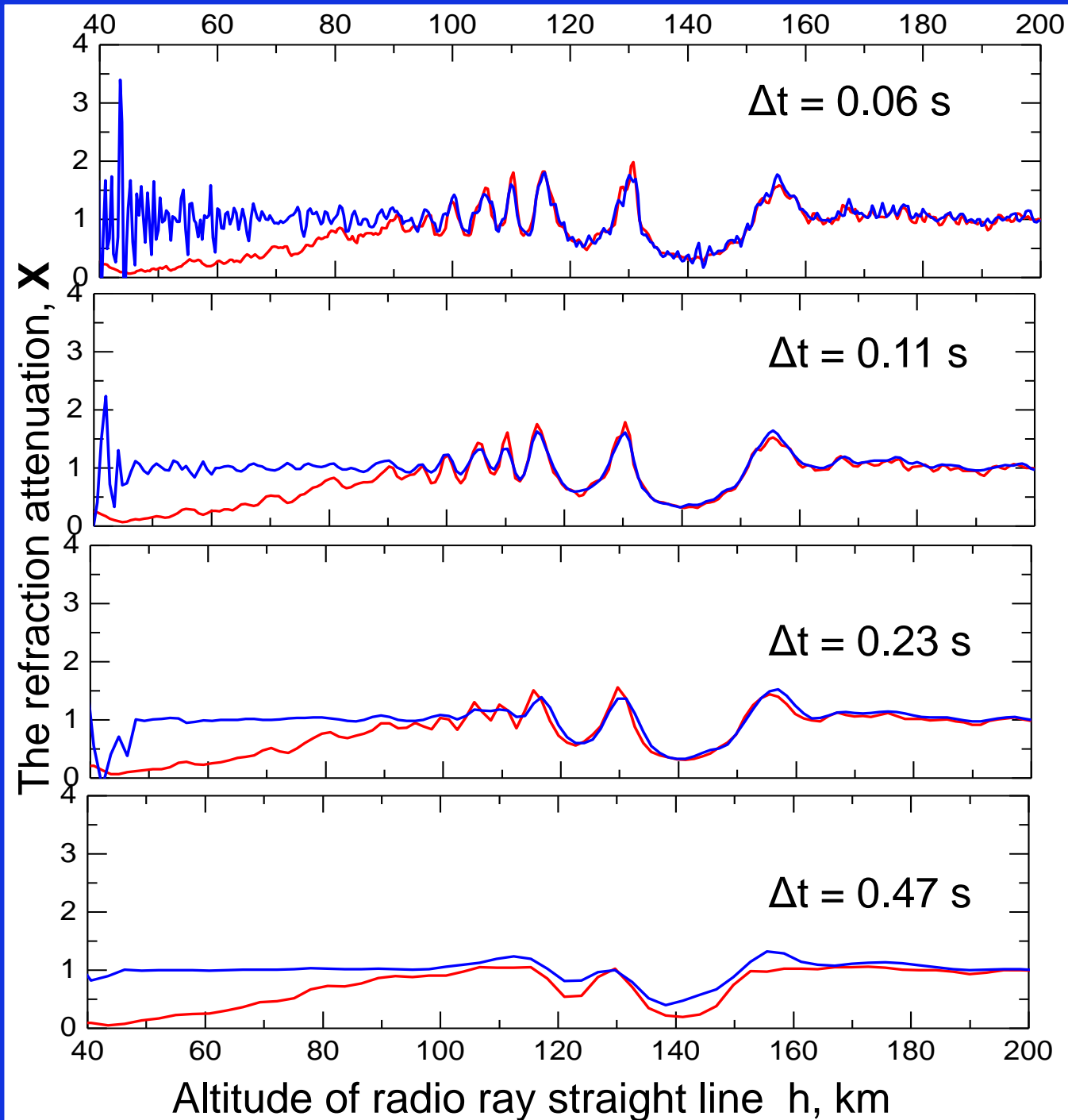
Let us suppose that the change of $X(t)$ in atmosphere is approximated by the dark curve.

Зарегистрированные вариации мощности радиоволны $P(t)$ прямо пропорциональны скорости изменения ее частоты $\Delta f(t)$.

$$\frac{P(t) - P_0}{P_0} = \frac{\lambda \cdot L}{V_{\perp}^2} \cdot \frac{d}{dt} \Delta f(t)$$

Hence the hypothesis $\Delta E / \Delta \omega = \text{const}$ is correct.

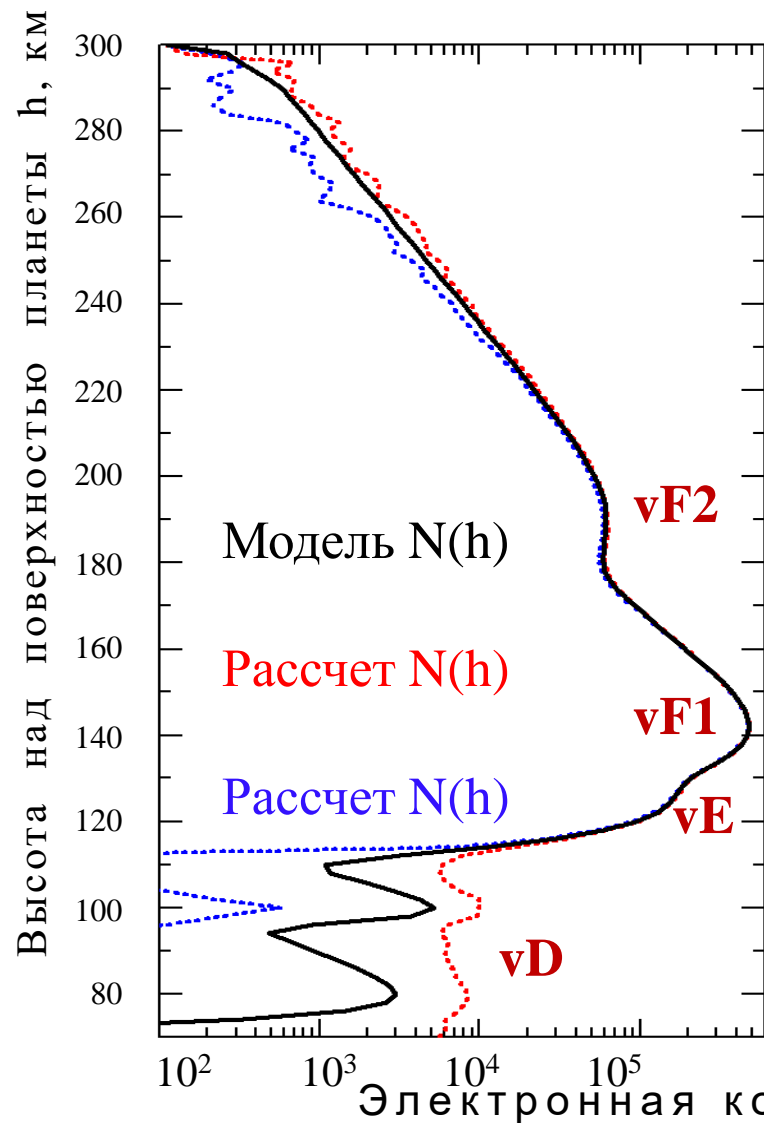
The difference between these two functions $[X(t) - X_{\Delta f}(t)]$ looks like noise with constant dispersion.



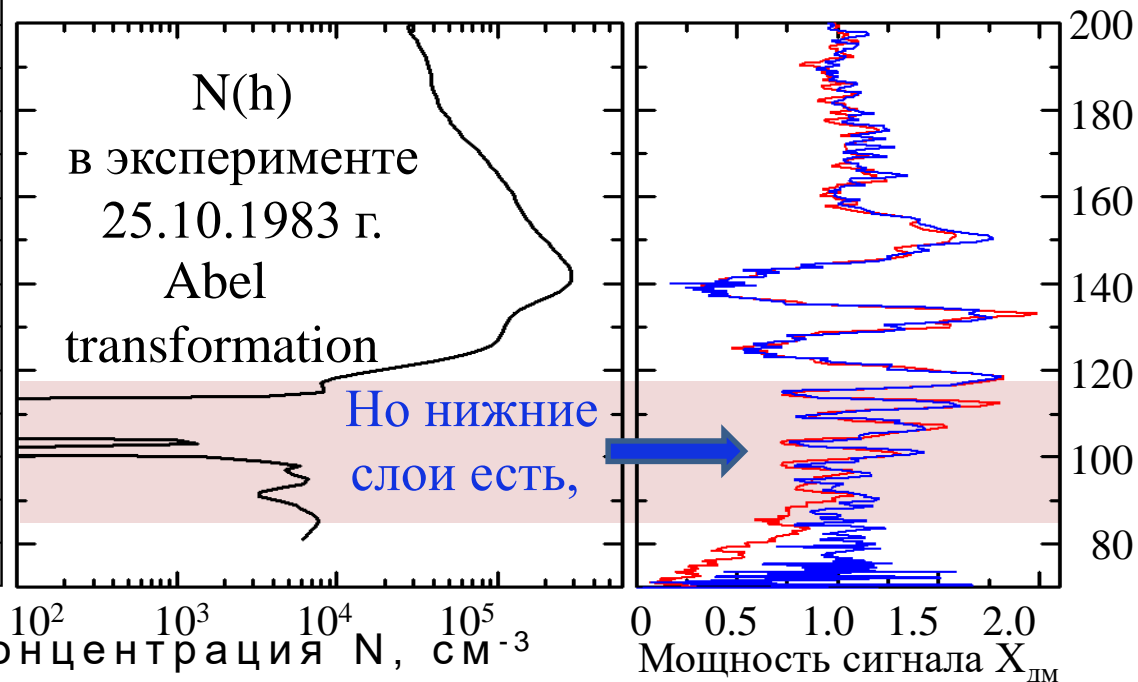
The method gives correct results for high-precision measurements of signal power during dual frequency radio sounding.

We can see that the increase in the interval Δt of measurements from 0.06 s to 0.47 s leads to a considerable distortion of the refraction attenuation.

Из результатов моделирования метода радиопросвечивания следует, что ниже 120 км погрешность определения $N(h)$ резко растет и приводит к неправильному определению $N(h)$ в нижней ионосфере. Поэтому ниже 120 км электронная концентрация может не исчезать вплоть до поверхности планеты, либо становиться отрицательной.



Разработана методика выделения влияния плазменных неоднородностей на фоне влияния разных мешающих факторов и шума. Она базируется на выявленной теоретической связи вариаций независимых параметров зондирующих радиосигналов (мощности и градиента частоты).



Сравнение вариаций мощности и скорости изменения частоты сигнала в нижней части ионосферы Земли

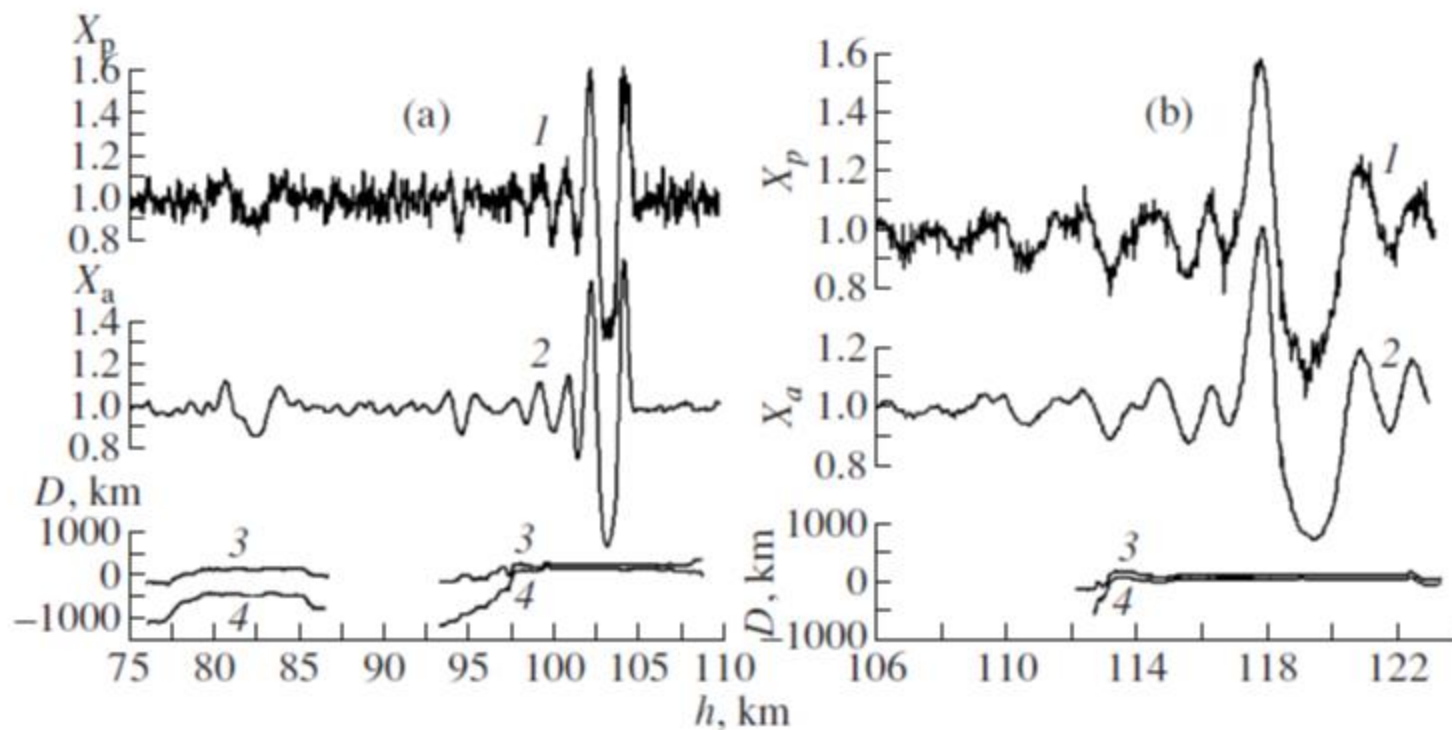


Fig. 6. Comparison of the variations in phase acceleration a translated into (curve (1) refractive attenuation X_p and (curve 2) refractive attenuation X_a obtained from amplitude data. The results of determination of shift d of turning point T from the ray perigee (curves 3 and 4, respectively). The data were obtained (a) by CHAMP (no. 0069) on Sept. 21, 2003, at $40^{\circ}24' \text{ N}$, $19^{\circ}36' \text{ W}$ and (b) by CHAMP (no. 0169) on July 5, 2003, at $29^{\circ}24' \text{ S}$, $232^{\circ}54' \text{ W}$.

Выводы

При оптимальных условиях экспериментов радиозондирования газовой оболочки Земли можно получить большой объем информации об ионосфере и атмосфере Земли и достоверно выявить возмущения профилей электронной концентрации в ионосфере, если выполнять обработку экспериментальных данных с использованием инварианта радиопросвечивания.

Совпадение данных о вариациях мощности и скорости изменения частоты сигнала будет свидетельствовать о достоверности полученных сведений о возмущениях высотного профиля электронной концентрации. Существенные различия вариаций мощности и скорости изменения частоты сигнала укажут на сильное влияние мешающих факторов, что позволит исключить из анализа данные профили электронной концентрации.

Для новых экспериментов радиозатменного мониторинга полярной ионосферы необходимо выбирать определенные орбиты спутника-приемника и измерять вариации частоты и мощности сигнала.

Работа выполнена в рамках государственного задания

Спасибо за внимание