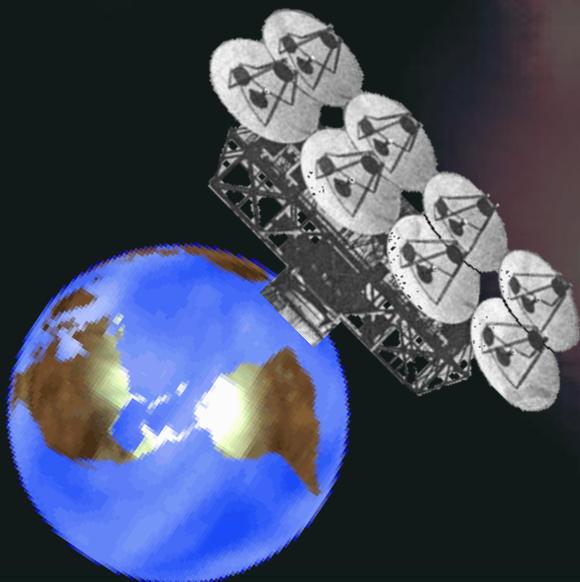


Волновые процессы в ионосфере Венеры по данным радиопросвечивания



Гаврик А. Л. alg248@hotmail.com

ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

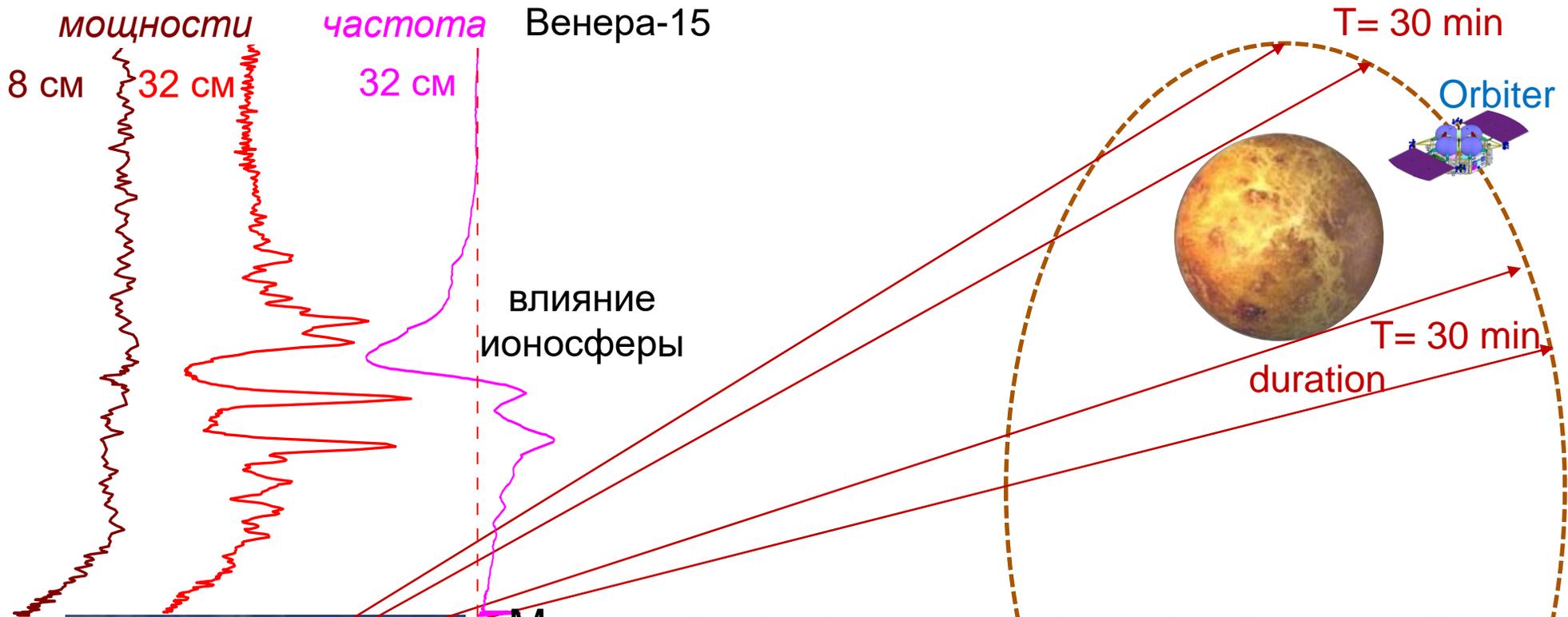


Двадцать вторая международная конференция
"СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА"

ИКИ РАН Москва

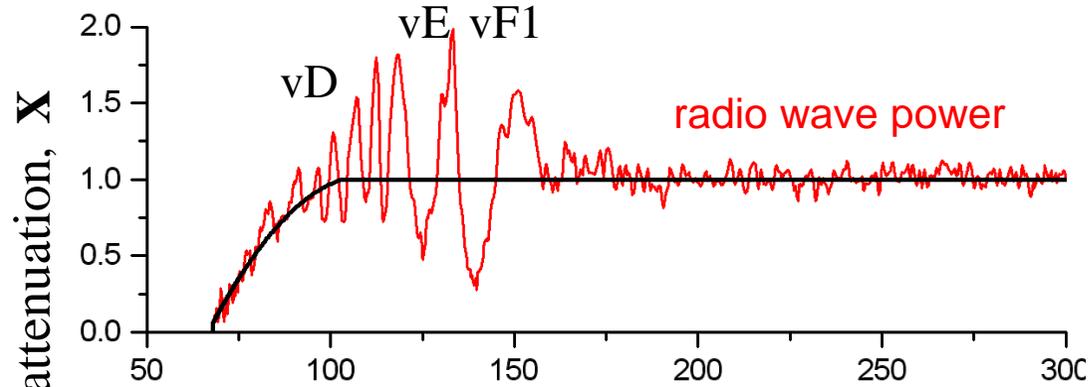
12 ноября 2024 г.

Схема радиопросвечивания ионосферы и атмосферы

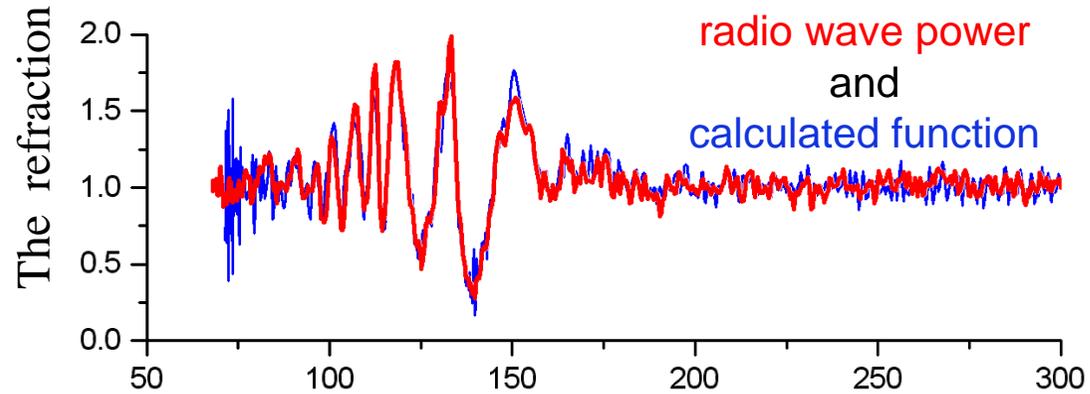


Мощность гармонического сигнала характеризует его энергию, а частота характеризует повторяемость процесса колебаний радиополя во времени, и в этом смысле мощность и частоту можно рассматривать как независимые характеристики зондирующей радиоволны, у которых нет корреляции между случайными флуктуациями.

The most interesting session is illustrated here.



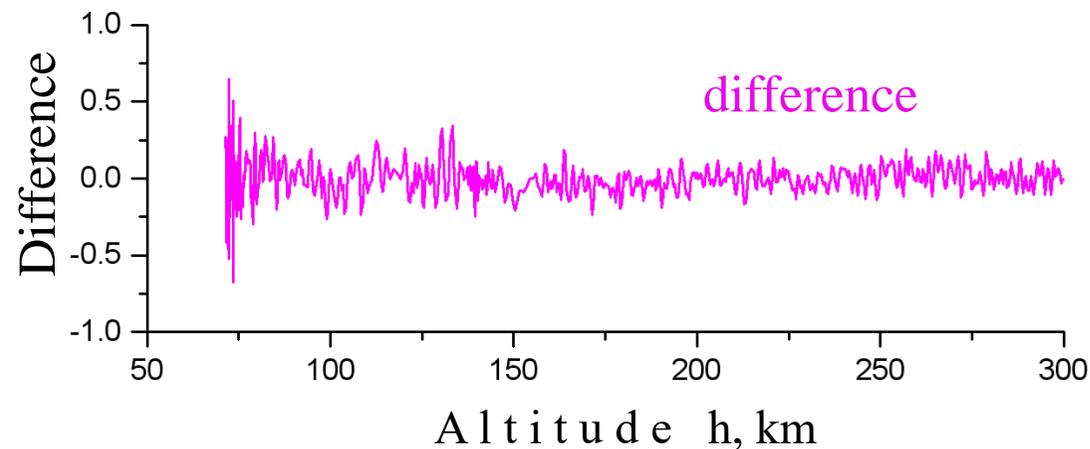
Let us suppose that the change of $X(t)$ in atmosphere is approximated by the dark curve.



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

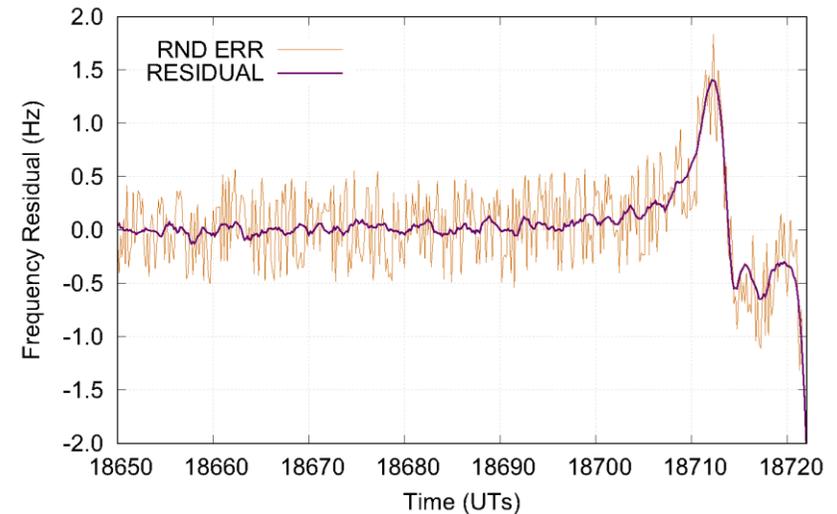
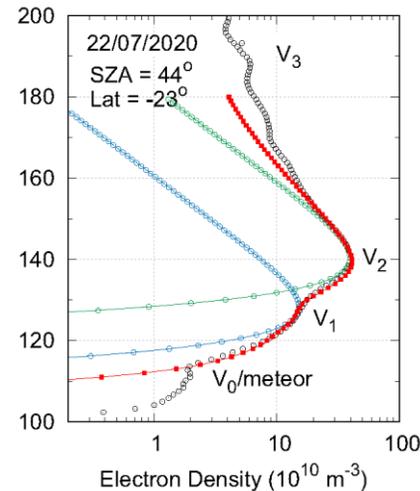
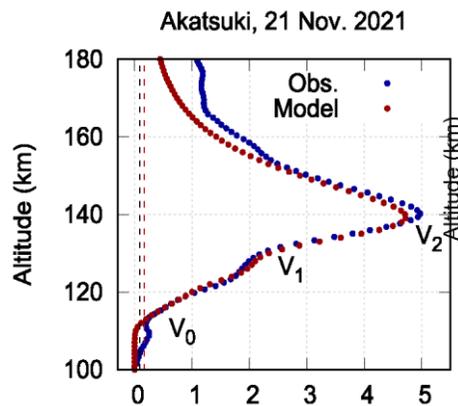
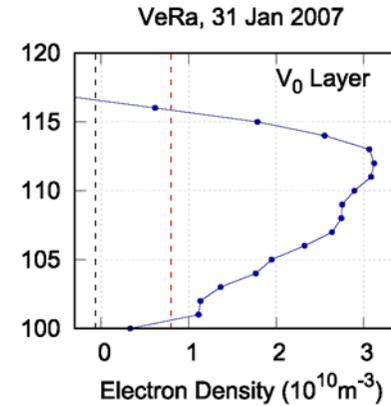
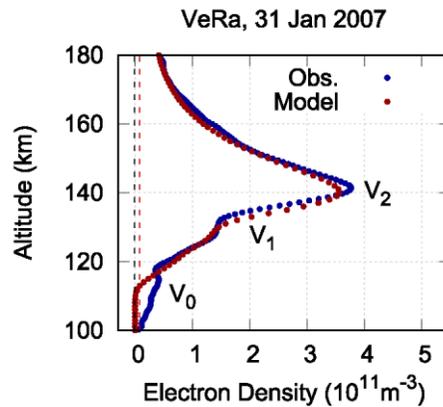
$$\frac{P(t) - P_0}{P_0} = \frac{\lambda \cdot L}{V_{\perp}^2} \cdot \frac{d}{dt} \Delta f(t)$$

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.

Наблюдения Акацуки и VEX «метеорного V₀ слоя»



Детальный анализ данных Акацуки и VeRa показывает, что появление слоя V₀ в ионосфере Венеры носит спорадический характер. Только **~30%** профилей VEX (34 из 110) и **26%** Акацуки (13 из 50 профилей) имели признаки его присутствия.

Tripathi K. R. et al. (2023). Gravity wave modulations at the lower altitudes of Venus ionosphere. *Geophysical Research Letters*, 50, e2022GL101793.

Проблемы при анализе экспериментальных данных

Модели предсказывают пики металлических ионов на Венере на высоте 120–130 км (Molina-Cuberos et al., 2008). Но пиковая высота слоя V0, по данным Акацуки и VEX, не превышает 117 км в дневное время.

Было показано, что волновая картина в E и D-областях ионосферы Земли и флуктуации плазмы возникают в ответ на воздействия ВГВ (Fritts & Lund, 2011). **Эти волны могут влиять на ионосферу Венеры (Майр и др., 1988).** Измерения PVO показали почти когерентные волны плотности электронов ниже 200 км в ионосфере Венеры, связанные с гравитационными волнами (Brace et al., 1983).

Наблюдения позволяют предположить глобальное присутствие ВГВ в атмосфере Венеры и их вертикальное распространение. Однако из-за процесса насыщения вблизи верхней границы облака может произойти рассеяние этих волн, генерируемых конвекцией (Bougher et al., 1997). В зависимости от потенциальной энергии эти волны могут далее распространяться в термосферу на большие высоты. В случае Венеры нет собственного магнитного поля, отсутствуют силы вращения, удерживающие ионы, поэтому **ионы легко реагируют на ВГВ, так же, как нейтральные молекулы.**

Tripathi K. R. et al. (2023). Gravity wave modulations at the lower altitudes of Venus ionosphere. *Geophysical Research Letters*, 50, e2022GL101793.

Проблемы при анализе экспериментальных данных

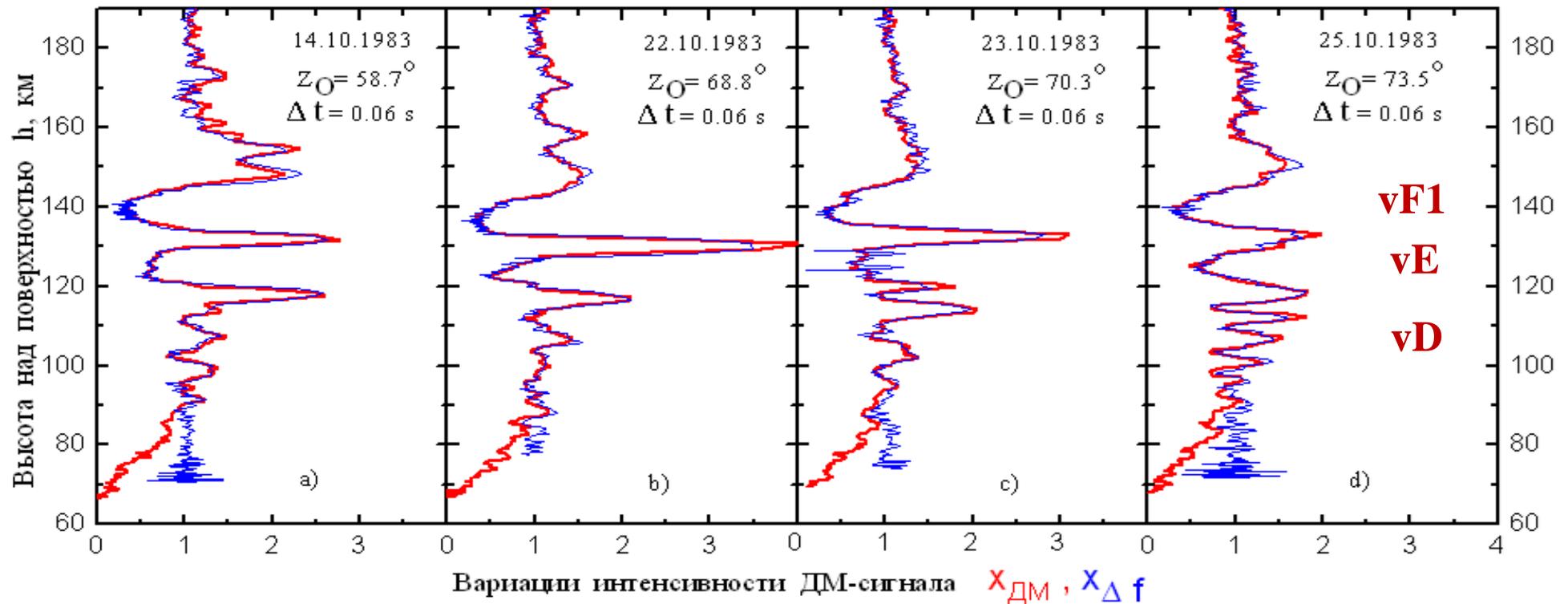
Наблюдали несколько случаев, когда слой V0 отсутствует, но ВГВ имеют значительный AGPE (средняя потенциальная энергия гравитационной волны).

Peter и др. (2021) предположили, что ионизация молекул оксида азота (NO) солнечным рентгеновским излучением (<2 нм) может привести к увеличению плотности NO⁺ в ионосфере Марса. Прямого доказательства, подтверждающего присутствие молекул NO в атмосфере Венеры нет, но NO⁺ являются одними из важных ионов ниже основания слоя V1 (Ambili et al., 2019; Fox & Sung, 2001).

В таком случае нижний слой должен быть стандартной чертой ионосферы Венеры. Но мы не видим частых проявлений этих слоев ни в ионосфере Венеры, ни в ионосфере Марса.

Tripathi K. R. et al. (2023). Gravity wave modulations at the lower altitudes of Venus ionosphere. *Geophysical Research Letters*, 50, e2022GL101793.

ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ИОНОСФЕРЕ ВЕНЕРЫ



Совпадение рефракционных вариаций мощности сигнала с вариациями, вычисленными из измеренной частоты сигнала, указывает на распространение волн плотности из атмосферы в ионосферу.

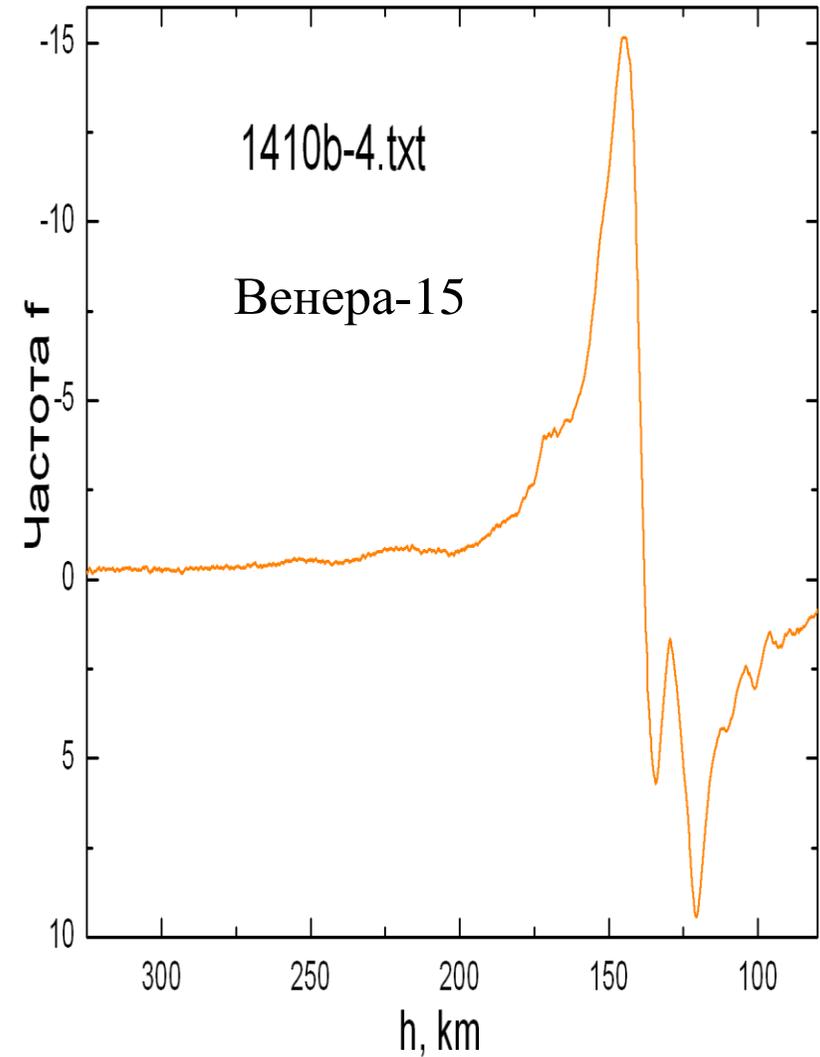
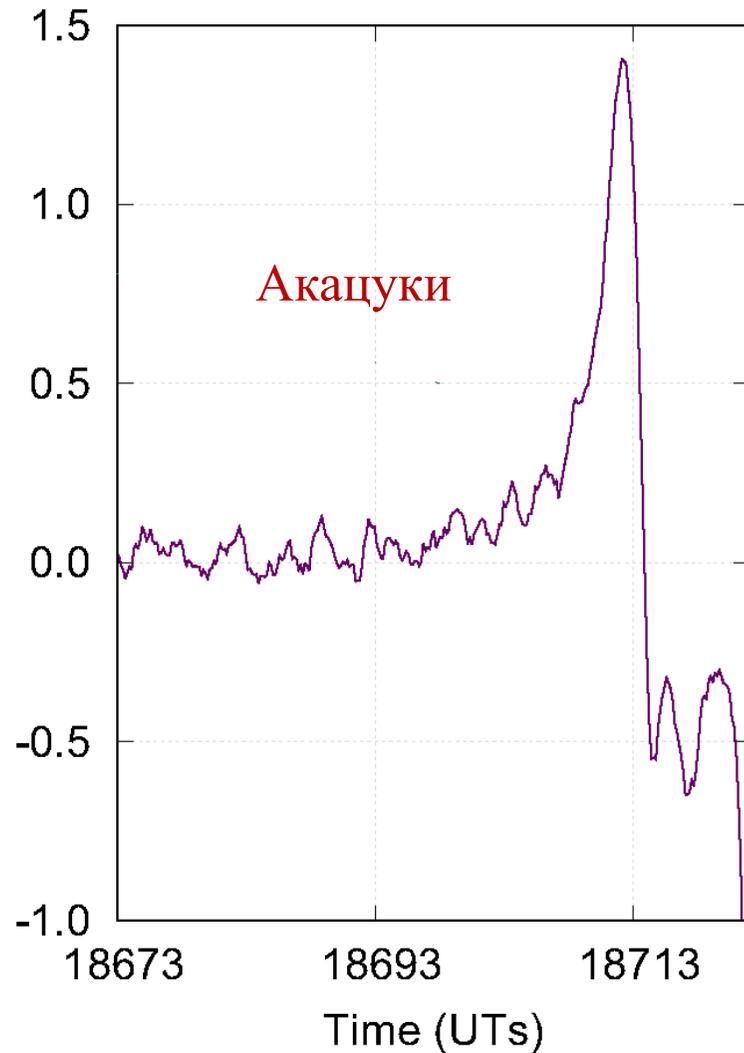
При малых мешающих факторах область vD наблюдалась во всех 19 сеансах для зенитных углов Солнца $56^\circ < Z < 87^\circ$, и колебания уменьшались с ростом Z .

В 7 сеансах из 9 при $87^\circ < Z < 92^\circ$ область vD проявлялась, но малый эффект сравним с шумами. Во всех 25 сеансах при $92^\circ < Z < 160^\circ$ аналогичные слои плазмы не наблюдались.

Следовательно, параметры нижней части ионосферы Венеры зависят от Z и она обнаруживается только на освещенной стороне, поэтому она аналог области D.

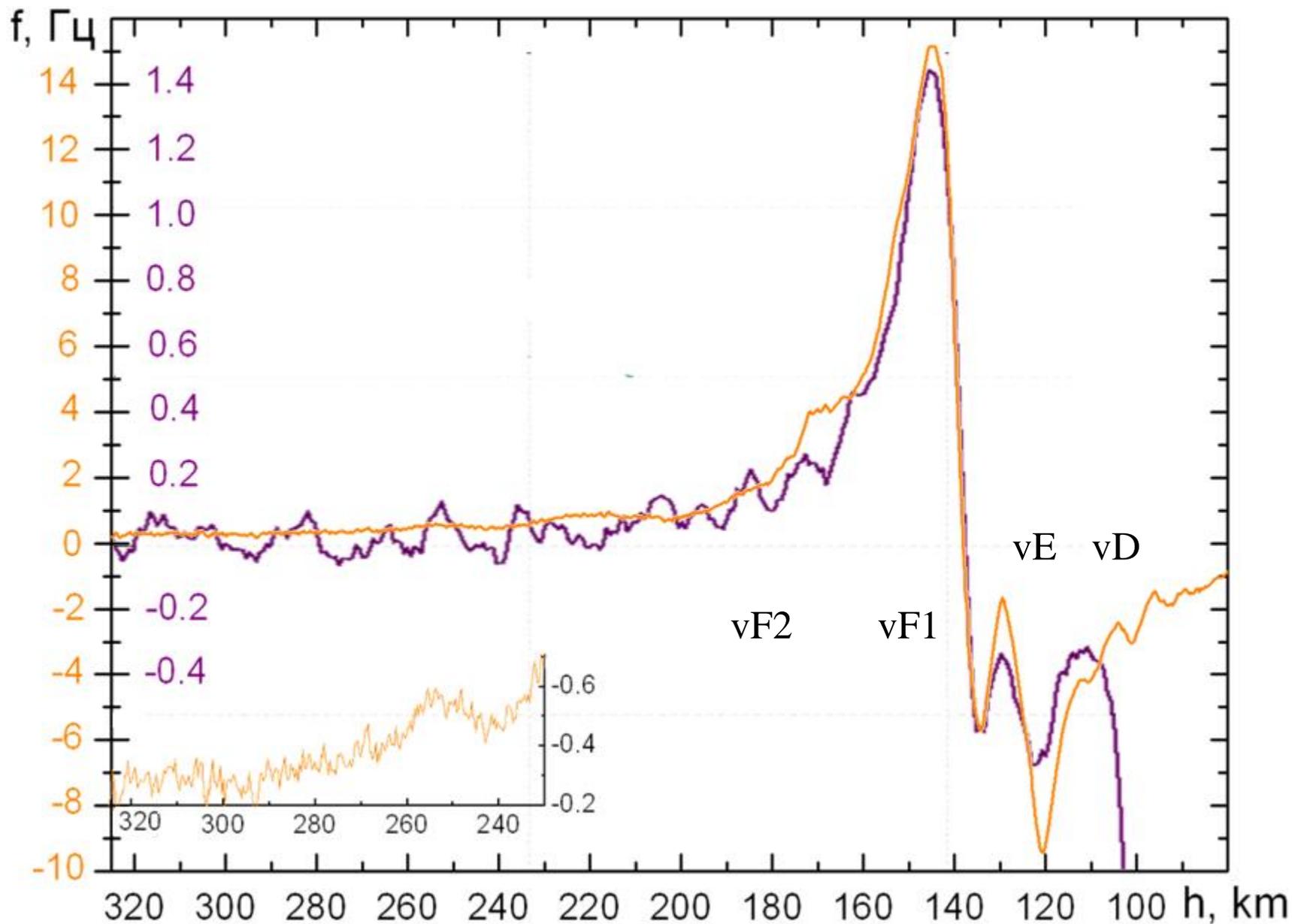
Проблемы при обработке экспериментальных данных

IDSN, 22 July 2020

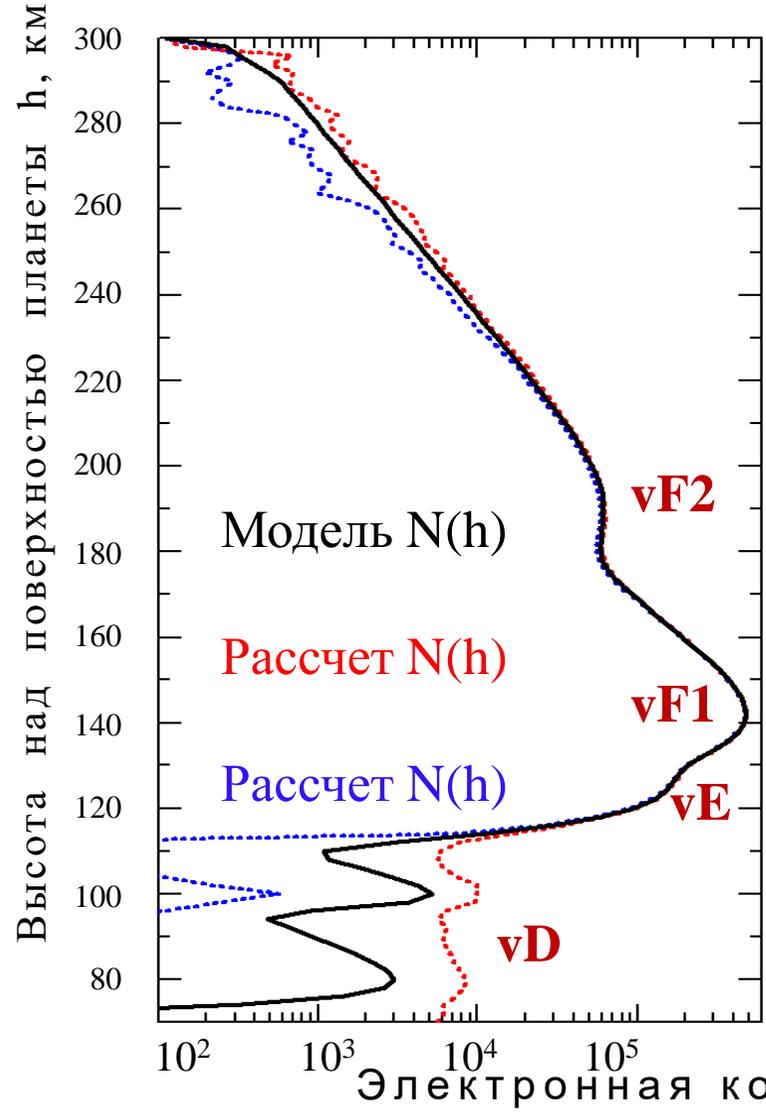


Tripathi, K. R., & Choudhary, R. K (2022). Quantification of errors in the planetary atmospheric profiles derived from radio occultation measurements. *Earth and Space Science*, 9, e2022EA002326.

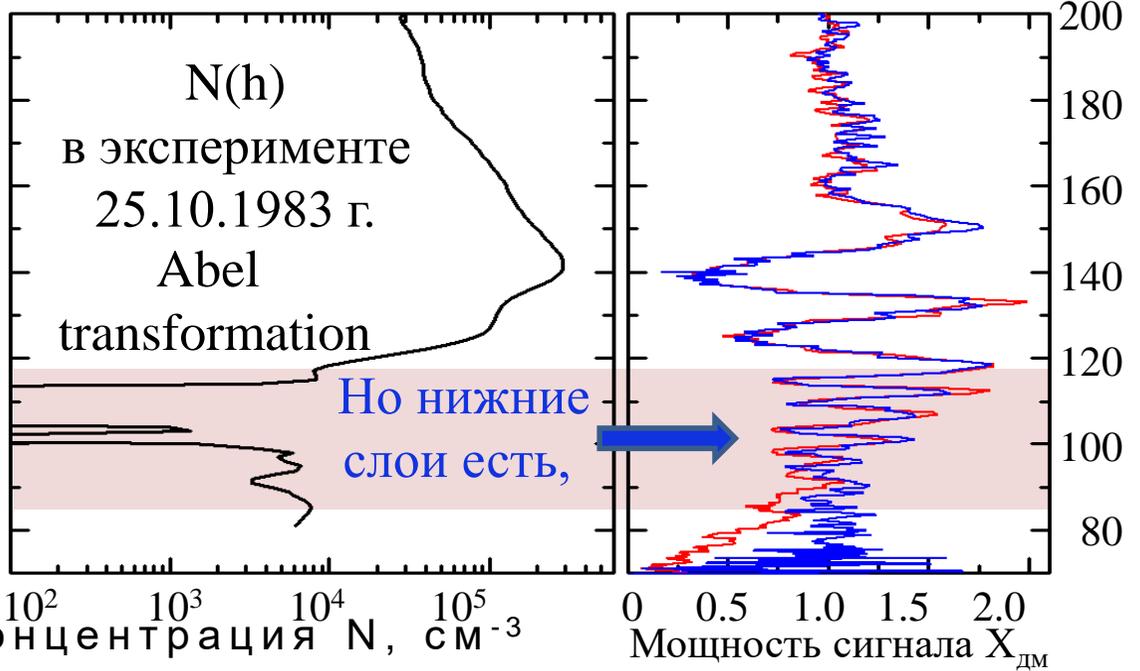
Вариации частоты сигнала в ионосфере по данным Акацуки и Венера 15



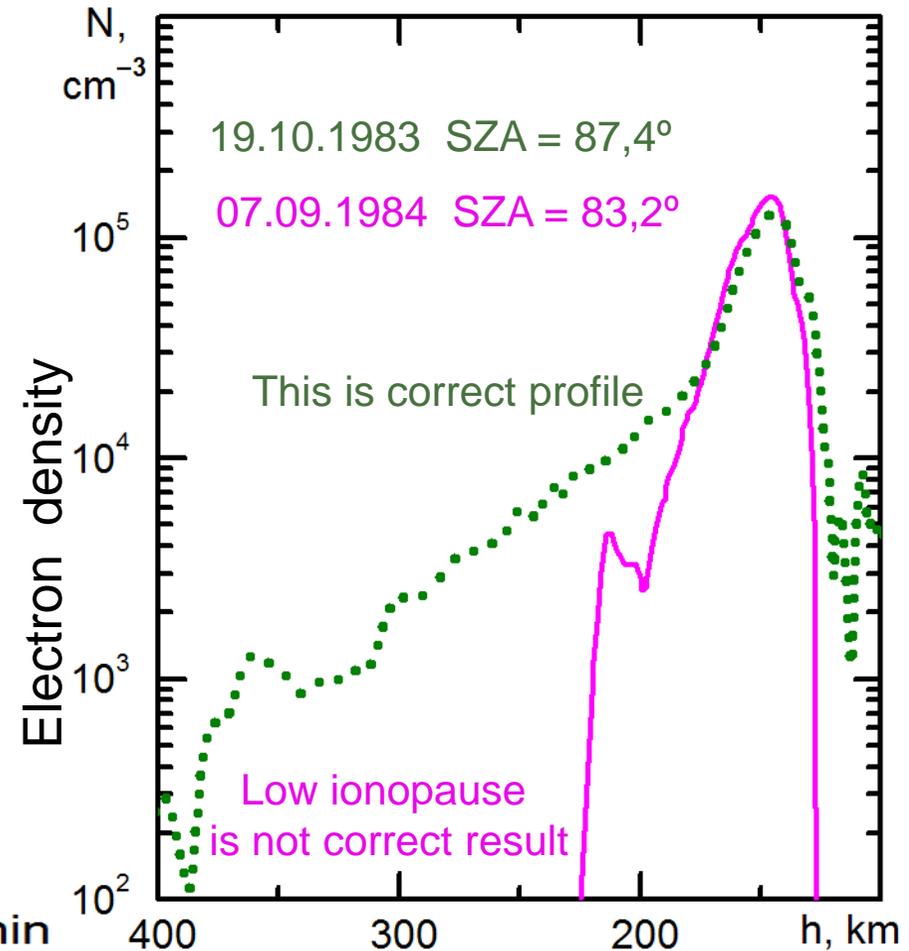
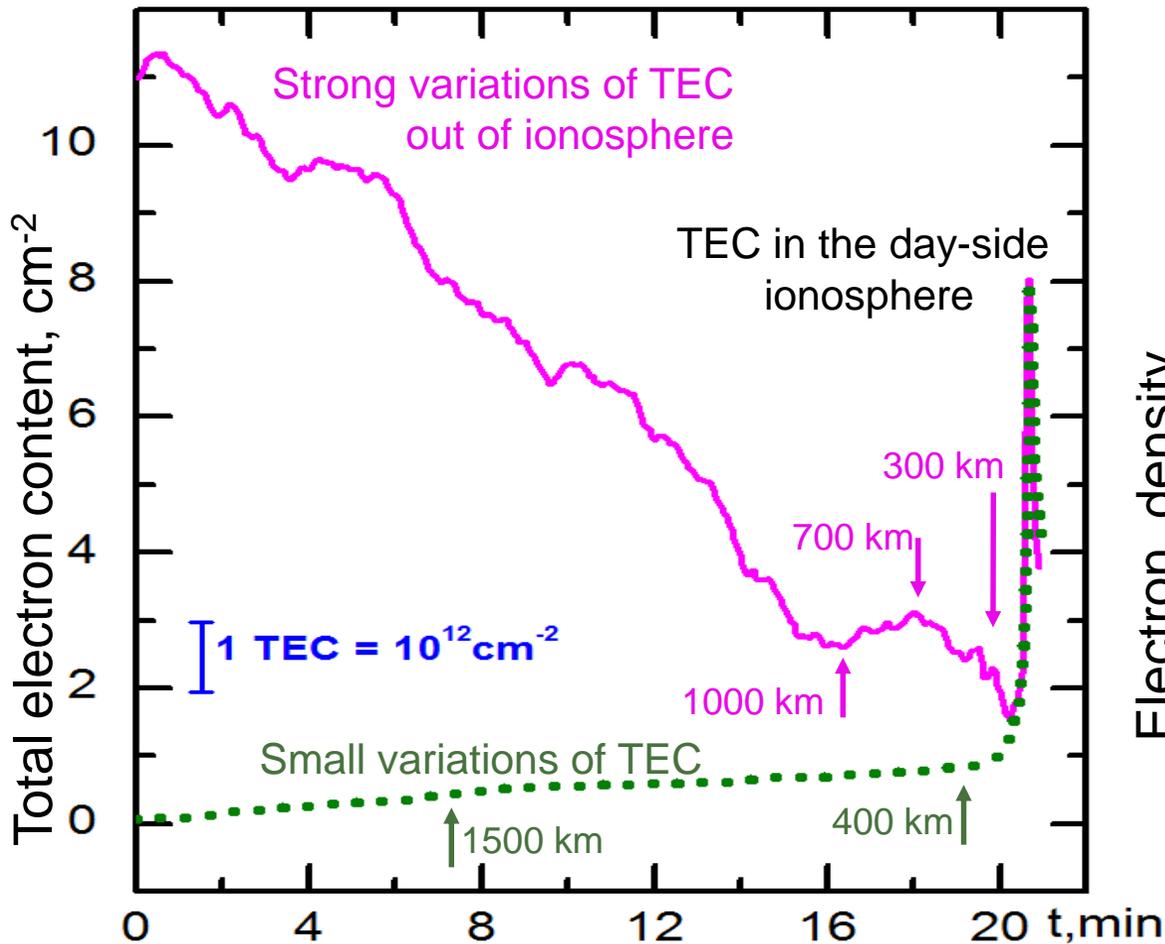
Из результатов моделирования метода радиопросвечивания следует, что ниже 120 км погрешность определения $N(h)$ резко растет и приводит к неправильному определению $N(h)$ в нижней ионосфере. Поэтому ниже 120 км электронная концентрация может не исчезать вплоть до поверхности планеты, либо становиться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

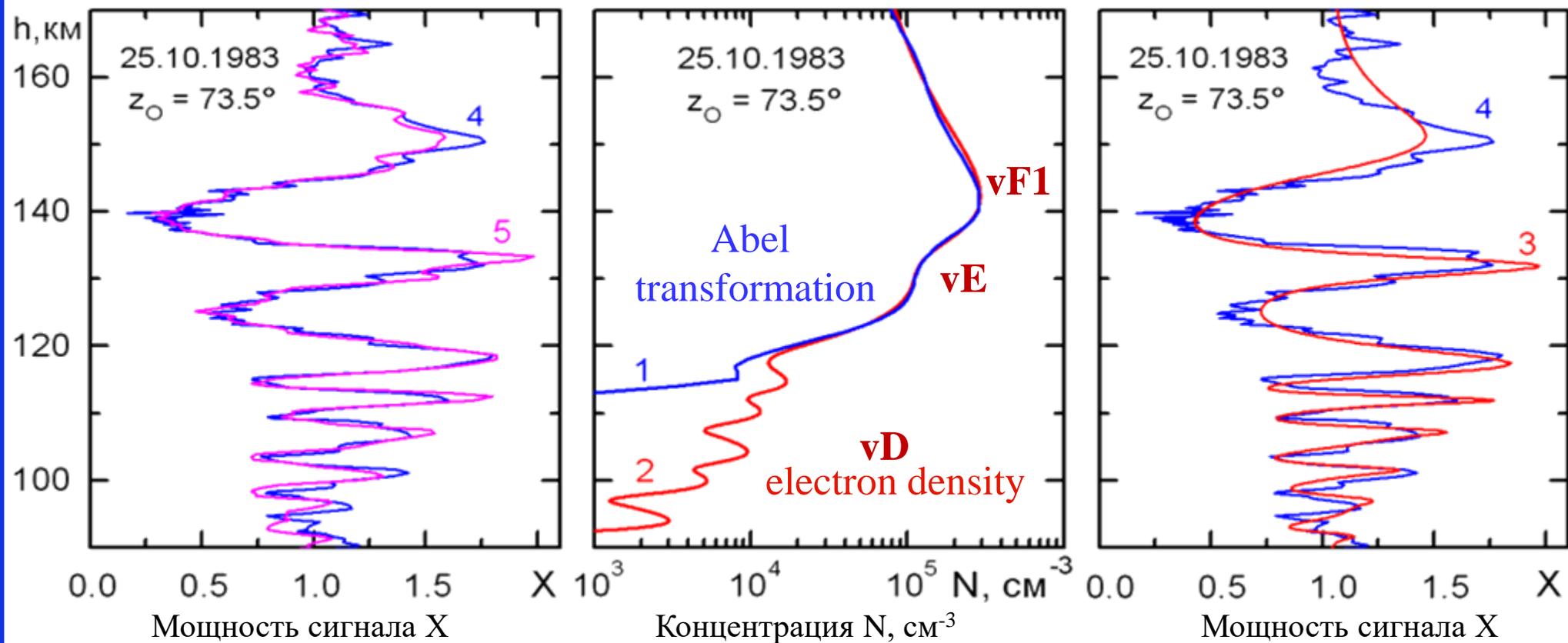


Random variations in the TEC and high noise of signal frequency are the major sources of ionopause altitude errors.



The data on the extent of day-side ionosphere can be used only when there are small TEC variations and instrumental noise.

Определение электронной концентрации в нижней ионосфере Венеры



- Кривая 1 – профиль $N(h)$ по экспериментальным данным $f(t)$ (преобразование Абеля).
Кривая 2 – профиль $N^*(h)$ соответствует экспериментальным данным $X(h)$ (кривая 3).
Кривая 3 – расчет $X(h)$ в лучевом приближении для профиля $N^*(h)$ (кривая 2).
Кривая 4 - экспериментальная функция $X_f(h)$, вычисленная из частоты сигнала.
Кривая 5 - экспериментальная функция $X(h)$ рефракционного изменения мощности.

Выводы

Нижний слой νD является стандартной чертой ионосферы Венеры. Его образование может быть обусловлено ионизацией молекул оксида азота (NO) солнечным рентгеновским излучением (<2 нм), что приводит к увеличению плотности NO^+ в нижней части ионосферы Венеры.

Наблюдения позволяют предположить глобальное присутствие ВГВ в атмосфере Венеры и их вертикальное распространение в термосферу на большие высоты. У Венеры нет магнитного поля, отсутствуют силы вращения, удерживающие ионы, поэтому ионы реагируют на ВГВ, так же, как нейтральный газ, и ВГВ могут играть важную роль в определении формы и структуры слоя νD .

Точность интерпретации данных радиозатмений зависит от характеристик радиотехнических комплексов, обеспечивающих выполнение экспериментов. **Использование радиоволны 3.6 см при радиопросвечивании нижних слоев ионосферы не позволяет выявить их структуру.** В то время как использование радиоволны 32 см и инварианта радиозатмения для анализа данных повышает достоверность полученных сведений и позволяет изучить распространение волн из атмосферы в ионосферу.;

Работа выполнена в рамках государственного задания

Спасибо за внимание