

Результаты двухчастотного радиопросвечивания дневной ионосферы Венеры

А.Л. Гаврик, Ю.А. Гаврик, Т.Ф. Копнина, Л.Н. Самознаев

Фрязинский филиал Учреждения Российской академии наук Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 141190, г. Фрязино, Моск. обл., пл. Б.А. Введенского, д.1, e-mail: alg248@ire216.msk.su

Дано описание методики анализа данных радиопросвечивания ионосферы Венеры. Приведены экспериментальные данные, свидетельствующие о слоистой структуре ионосферы Венеры. Показано существование нижней области в дневной ионосфере Венеры.

New method of radio occultation data handling is given. Experimental data showing the layer structure of the daytime Venus ionosphere. New lower ionospheric layers in the daytime Venus ionosphere are detected.

В течение длительного времени для изучения физических характеристик различных космических сред дистанционными методами в нашей стране использовались радиосигналы дециметрового диапазона, с помощью которых обеспечивалась радиосвязь с межпланетными станциями. С целью уменьшения влияния движения космического аппарата (КА), нейтральной среды и инструментальных погрешностей на измеряемые характеристики радиосигналов применялась комбинация когерентных радиоволн дециметрового ДМ ($\lambda=32$ см) и сантиметрового СМ ($\lambda=5$ и/или 8 см) диапазонов. Для решения тех же задач в США, Европейском космическом агентстве и Японии используется когерентная комбинация более высокочастотных сигналов: S-диапазон ($\lambda=13.1$ см) и X-диапазон ($\lambda=3.6$ см). Различие в длинах волн зондирующих сигналов ($\lambda=32$ и 13 см) обусловило существенное преимущество отечественных экспериментов по сравнению с иностранными экспериментами, проявившееся в исследованиях разреженных плазменных оболочек. Рефракционные эффекты в плазме при использовании ДМ-сигнала в 6 раз больше по сравнению с сигналом S-диапазона, следовательно, эффекты меньше маскируются шумами, что явилось главным фактором для надежного определения параметров ночной ионосферы Марса и обнаружения разреженной плазменной оболочки Луны. Когерентными сигналами КА ВЕГА-1,-2 исследована плазменная оболочка кометы Галлея [1,2], которую удалось проследить до расстояний 10^5 км от кометы. Серия радиозатменных экспериментов с КА ВЕНЕРА-9,-10 в 1975 г. обнаружила двухслойную ночную ионосферу Венеры с концентрацией 10^3 см⁻³ в нижнем слое [3]. Новые уникальные сведения об ионосфере Венеры были получены по результатам эксперимента двухчастотного радиопросвечивания с помощью КА ВЕНЕРА-15,-16, который проводился в 1983-1984 г. [4-7].

Двухчастотное радиопросвечивание ионосферы Венеры

В эксперименте с КА ВЕНЕРА-15,-16 впервые была использована цифровая регистрация зондирующих радиосигналов [4,5], что позволило создать базу данных на современных носителях информации, а через 24 года разработать и применить новые технологии обработки данных радиопросвечивания [6,7]. За один год исследований с помощью КА ВЕНЕРА-15,-16 проведено 155 просвечиваний ионосферы Венеры, что составляет ~20% от общего количества во всех миссиях к Венере. На основе радиозатменных данных получили высотные профили электронной концентрации $N(h)$ и выявили закономерности изменения $N(h)$ при изменении условий освещенности Солнцем [4,5], кроме того, впервые получили достоверные сведения о тонкой структуре ионосферы Венеры в тех областях, где её концентрация становится очень малой на высотах 80...120 км над поверхностью планеты [6,7].

Отметим, что к настоящему времени ионосфера Марса исследована более детально, количество просвечиваний превышает 6000, в то время как количество просвечиваний ионосферы Венеры на порядок меньше. На контурной карте $N(h)$, представленной на рис. 1, видно, что почти не исследованы области малых зенитных углов Солнца Z_0 на дневной стороне и больших Z_0 на ночной стороне. Контурная карта демонстрирует основные закономерности, обусловленные увеличением Z_0 : увеличение высоты ионопаузы от 350 до 700 км при приближении к терминатору, ее резкое уменьшение ночью, уменьшение концентрации в максимуме на порядок при увеличении Z_0 и т.п.

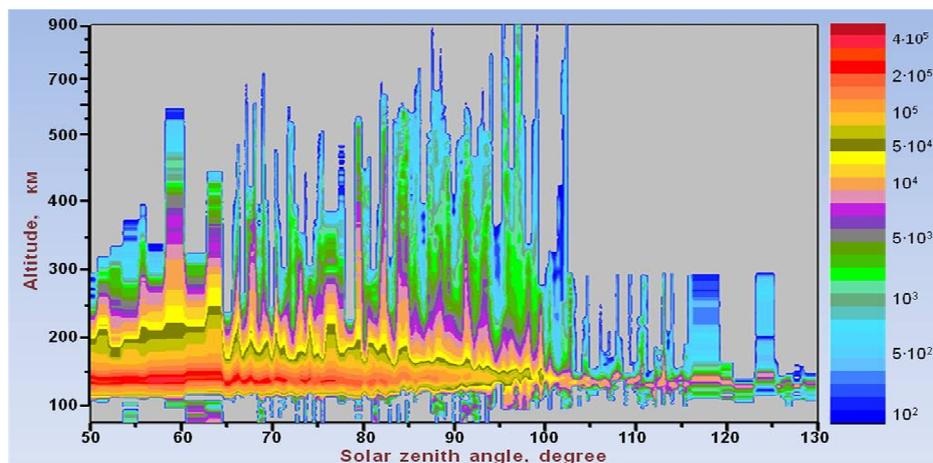


Рис. 1. Контурная карта электронной концентрации по данным двухчастотного радиопросвечивания демонстрирует закономерности изменения параметров ионосферы и показывает исследованные диапазоны зенитных углов Солнца

На рис. 2а,2б показаны профили $N(h)$, полученные по данным КА ВЕНЕРА-15,-16 вблизи области терминатора $85^\circ < Z_0 < 99^\circ$. Основной чертой верхней ионосферы является наличие протяженной области плазмы с медленно меняющейся концентрацией, величина которой варьируется от сеанса к сеансу от $5 \cdot 10^2$ до $4 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$, что может быть обусловлено вариациями характеристик потока солнечного ветра, влияющего на процессы переноса плазмы с дневной стороны на ночную сторону. В области полной тени при $Z_0 > 96^\circ$ высотная протяженность ионосферы по данным радиопросвечивания резко уменьшается и основное тело ночной ионосферы располагается, как правило, ниже 300 км. На рис. 2в,2г показаны типичные распределения электронной концентрации в ночной ионосфере. Главной их особенностью является то обстоятельство, что $N(h)$ -профиль может иметь либо один, либо два максимума электронной концентрации.

Физические механизмы формирования дневной и ночной ионосферы отличаются. Именно поэтому в области терминатора на $N(h)$ -профилях чередуются проявления характерных особенностей, наблюдавшихся как в дневной ионосфере, так и в ночной ионосфере. Когда вклад ионизирующего излучения Солнца в концентрацию плазмы преобладающий, на профилях $N(h)$ наблюдаются и главный максимум $N(h)$, и нижний максимум $N(h)$ в виде перегиба профиля с концентрацией на порядок меньше. На рис. 2а нижний максимум в виде перегиба заметен на высотах 135...138 км. Этот слой, всегда присутствующий в дневной ионосфере, обусловлен поглощением мягкого рентгеновского излучения Солнца. Все три распределения $N(h)$ на рис. 2а подобны распределениям для дневных условий, поэтому уменьшение интенсивности ионизирующего излучения Солнца с увеличением Z_0 приводит к закономерному уменьшению концентрации электронов в главном и нижнем максимумах ионизации.

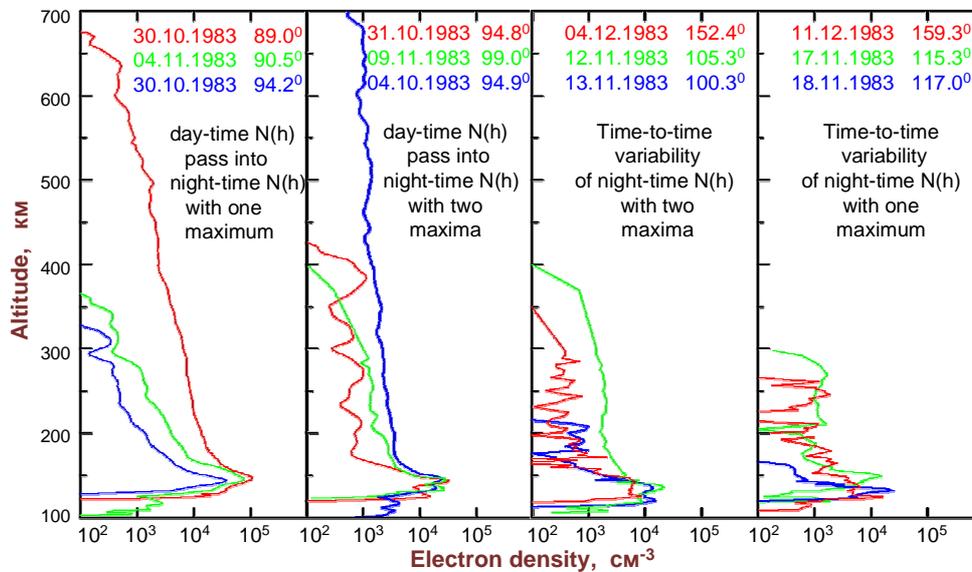


Рис. 2. Профили $N(h)$, полученные по данным спутников ВЕНЕРА-15,-16 вблизи области терминатора при $85^\circ < Z_0 < 99^\circ$ (а,б) и в ночной ионосфере при $Z_0 > 99^\circ$ (в,г)

Когда на образование ионосферы помимо ионизирующего излучения Солнца существенное влияние оказывает процесс перетекания плазмы через терминатор с дневной стороны на ночную сторону, распределения $N(h)$ меняются. На рис.2б показаны профили $N(h)$ с двумя максимумами, причем концентрация в максимумах сравнима по величине и именно это обстоятельство является главным отличием области терминатора от дневной ионосферы. Из-за наличия ионизации солнечным излучением в области терминатора верхний максимум всегда больше по величине, чем нижний – в этом проявляется отличие от ночных условий, в которых верхний максимум может быть меньше по величине, чем нижний (рис.2в), потому что механизм его образования не связан с поглощением солнечного излучения.

При определении ионосферных характеристик по данным радиопросвечивания используется известный способ, основанный на применении интегрального преобразования Абеля, связывающего изменение частоты сигнала $\Delta f(t)$ с искомым высотным профилем электронной концентрации [6,7]. Эту традиционную методику можно применять при обработке и анализе экспериментов двухчастотного радиопросвечивания: на ночной стороне планеты она позволяет найти достоверные значения концентрации плазмы в высотном интервале 100...300 км, а на дневной стороне от ~120 км до высоты ионопаузы. На низких высотах, как показывают результаты численного моделирования эксперимента радиопросвечивания, представленные на рис. 3а, из-за влияния шума невозможно достоверно определить концентрацию плазмы. Действительно, на экспериментальном профиле $N(h)$ ниже 115 км наблюдается (рис. 3б) быстрое уменьшение $N(h)$ до отрицательных значений. Этот эффект можно интерпретировать как прохождение нижней границы ионосферы, а появление положительных значений $N(h)$ ниже 100 км может характеризовать погрешности $N(h)$. Но в данном сеансе такая интерпретация не соответствует действительности. На рис 3в показано совпадение рефракционных ослаблений (измеренных и вычисленных из частоты сигнала), доказывающее существование нижней части ионосферы в диапазоне высот 85...115 км. Это означает, что традиционный метод не позволяет исследовать нижнюю область ионосферы.

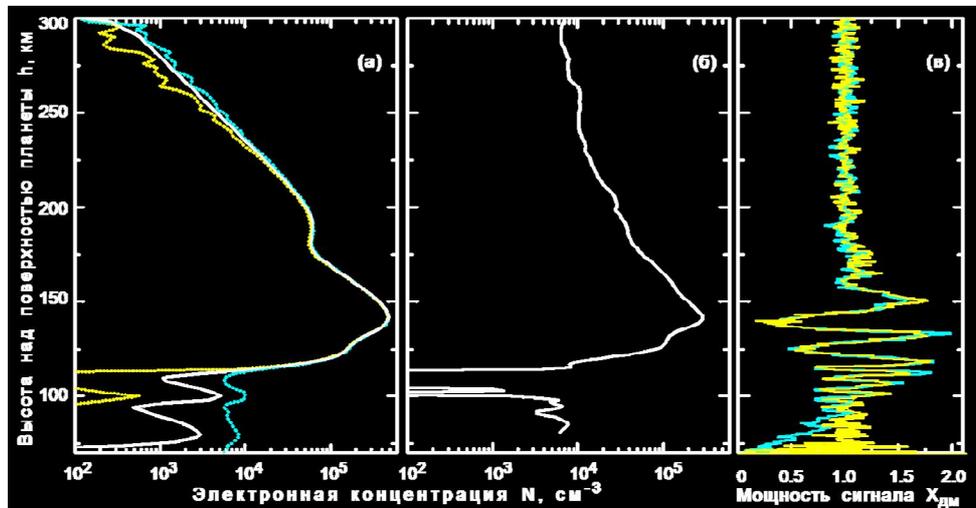


Рис. 3. Сравнение результатов моделирования эксперимента радиопросвечивания и экспериментальных данных. (а) - Результаты расчетов $N(h)$ при наличии погрешностей в измерениях $\Delta f(t)$ показывают либо большую положительную концентрацию (красная линия), либо отрицательную концентрацию с тонкими положительными пиками (синяя кривая), причем ошибка определения $N(h)$ может быть на порядок больше истинного значения $N(h)$ (чёрная кривая). (б) - Распределение $N(h)$, полученное по данным радиопросвечивания 25.10.1983 г., демонстрирует недостоверность определения $N(h)$ ниже 120 км. (в) - Совпадение вариаций $X_{DM}(t)$ (красная кривая) с $X_{\Delta f}(t)$ (синяя кривая) в сеансе 25.10.1983 г. свидетельствует о наличии плазменных слоев в интервале высот 85...200 км

Обнаружение ионизованных слоев в ионосфере Венеры

Для увеличения потенциала метода радиопросвечивания целесообразно использовать разработанную высокочувствительную методику [6,7], обеспечивающую детектирование ионизованных слоев с малой концентрацией. Она базируется на установленной теоретической связи мощности с градиентом частоты и прецизионном измерении огибающей и фазы когерентных сигналов. В просвечиваемой ионосфере вариации мощности $X(t)$, обусловленные рефракцией радиоволн, будут прямо пропорциональны вариациям градиента частоты $\Delta f(t)$, обусловленным влиянием плазмы [6,7]. Формирование частоты $\Delta f(t)$ из приведенной разности частот ДМ- и СМ-сигналов позволяет исследовать только влияние плазмы и исключает влияние нейтральной атмосферы, нестабильность задающих генераторов и погрешности траекторных данных [3,4]. Исключение главных источников погрешностей метода одночастотного радиопросвечивания значительно увеличивает точность определения характеристик ионосферы.

Результаты сравнения рефракционного ослабления $X_{DM}(t)$ с рефракционным ослаблением $X_{\Delta f}(t)$, найденным из частотных данных $\Delta f(t)$, представлено на рис. 4. Совпадение вариаций рефракционного ослабления $X_{DM}(t)$ радиосигнала с вариациями $X_{\Delta f}(t)$, полученными из частоты, свидетельствует о влиянии регулярных структур исследуемой ионосферы, что является следствием полученного теоретического соотношения [6,7]. Отсутствие такой связи будет свидетельствовать о влиянии шума либо неучтенных факторов. Анализ корреляции $X_{DM}(t)$ с $X_{\Delta f}(t)$ особенно важен при исследовании разреженной среды, где эффекты сравнимы по величине с флуктуациями шума.

На рис. 4 видно, что ниже ~80 км корреляция между вариациями $X_{DM}(t)$ и $X_{\Delta f}(t)$ отсутствует, что свидетельствует об отсутствии плазмы, потому что источники шума для $X_{DM}(t)$ и $\Delta f(t)$ разные. Рефракционное ослабление $X_{DM}(t)$ в атмосфере уменьшается с ростом высоты радиолуча, но на высотах 80...100 км оно еще заметно, что приводит к несовпадению $X_{DM}(t)$ с $X_{\Delta f}(t)$, однако, в этом высотном интервале уже наблюдается корреляция вариаций $X_{DM}(t)$ и $X_{\Delta f}(t)$, свидетельствующая о появлении ионосферной плазмы. Именно таким образом было установлено регулярное существование нижней

области ионосферы. Совпадение вариаций $X_{DM}(t)$ с $X_{\Delta f}(t)$ в области главного и нижнего максимумов ионизации является экспериментальным доказательством справедливости теоретических выводов. В верхней ионосфере на высотах 155...200 км максимумы рефракционного усиления мощности радиосигнала свидетельствуют о наличии значительных градиентов электронной концентрации в этих областях, а совпадение $X_{DM}(t)$ с $X_{\Delta f}(t)$ подтверждает, что максимумы $X_{DM}(t)$ обусловлены слоистой структурой ионосферы, а не влиянием шума или других мешающих факторов.

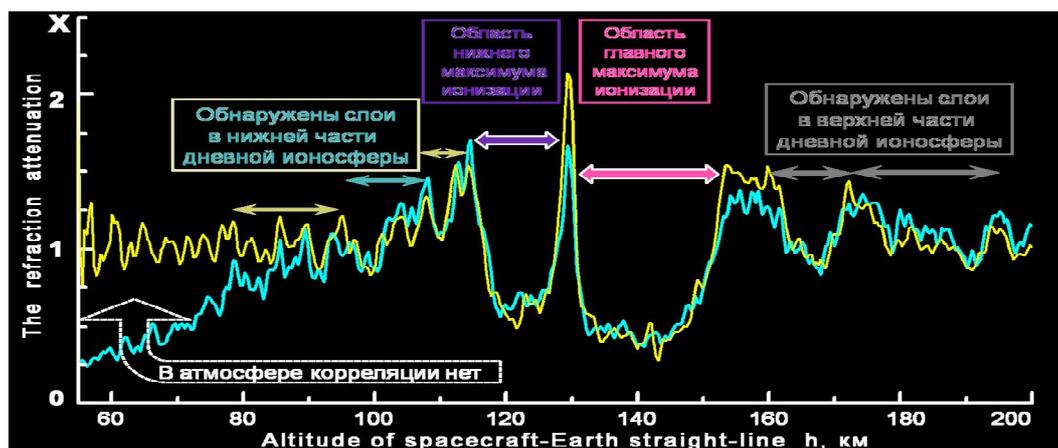


Рис. 6. Корреляция рефракционного ослабления сигнала X_{DM} (красная кривая) с вычисленным из частоты сигнала ослаблением $X_{\Delta f}(t)$ (синяя кривая) свидетельствует о влиянии плазмы, а не шума или других мешающих факторов

Такая методика достоверно разделяет влияние атмосферы, ионосферы и шума, что обеспечивает возможность радиовидения разреженных плазменных слоев на малых высотах и в ночной ионосфере, где влияние атмосферы, ионосферы и шума сравнимы по величине. Данные двухчастотного радиопросвечивания, полученные с помощью станций ВЕНЕРА-15,-16 и обработанные с применением новых технологий, подтвердили теоретические выводы и показали, что вариации рефракционного ослабления сигнала 32 см при просвечивании ионосферы всегда прямо пропорциональны вариациям градиента его частоты. Корреляция $X_{DM}(t)$ с $X_{\Delta f}(t)$ доказывает существование нижней области ионосферы на высотах 85...120 км и расслоение ионосферы на высотах 155...200 км. Такие свойства дневной ионосферы Венеры ранее не обнаруживали ни в одном эксперименте из-за недостаточной чувствительности использовавшихся методов.

Авторы выражают благодарность Н.А. Арманду за обсуждение полученных результатов.

Работа выполнена при поддержке программы ОФН РАН № VI.15.

Литература

1. Савич Н.А., Алтунин В.И., Андреев В.Е. и др. // Письма в АЖ. 1986. Т.12.№ 9. С. 675.
2. Андреев В.Е., Гаврик А.Л. // Письма в АЖ. 1993. Т. 19, № 12. С. 1081-1089.
3. Александров Ю.Н., Васильев М.Б., Вышлов А.С. и др.//ДАН. 1976. Т. 229. № 1. С. 55.
- 4.Савич Н.А., Андреев В.Е. и др.//Радиотехника и электроника.1986. Т.31.№ 11.С. 2113.
5. Гаврик А.Л., Самознаев Л.Н.//Космические исследования. 1987.Т.25. № 2. С. 285-291.
6. Гаврик А.Л., Павельев А.Г. и др.//Солнечно-земная физика.2008. Т.2.№12.С. 203-205.
7. Гаврик А.Л., Гаврик Ю.А. и др. // Радиотехника и электроника. 2010. Т. 55. № 3. С. 277-284.