

УДК 523.62-726+523.98:520.876

ОБНАРУЖЕНИЕ ИОНОСФЕРНЫХ СЛОЕВ В ДНЕВНОЙ ИОНОСФЕРЕ ВЕНЕРЫ НА ВЫСОТАХ 80–120 км ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ДВУХЧАСТОТНОГО РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЯ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ «ВЕНЕРА-15, -16»

А.Л. Гаврик, А.Г. Павельев, Ю.А. Гаврик

THE DETECTION OF IONOSPHERIC LAYERS IN THE DAYTIME VENUSIAN IONOSPHERE AT HEIGHTS OF 80–120 km USING RESULTS OF TWO-FREQUENCY RADIO-RAYING BY VENERA-15, -16

A.L. Gavrik, A.G. Pavelyev, Yu.A. Gavrik

Предложена методика анализа радиозатменных данных, позволяющая достоверно разделить влияние шума, ионосферы и атмосферы на результаты радиопросвечивания, что обеспечивает возможность более точного исследования механизмов формирования ионосферы. Показано, что в дневной ионосфере Венеры на высотах от 80 до 120 км существуют ионизованные слои. Положение нижней границы этой ионизованной области может варьировать в диапазоне 80–100 км, а градиенты электронной концентрации могут меняться в несколько раз.

We propose a technique for analyzing radio eclipsing data. It permits reliable separation of influence of the noise, ionosphere, and atmosphere on radio-raying results. This enables more accurate research into mechanisms of the ionosphere formation. Ionized layers are shown to exist in the daytime Venusian ionosphere at heights of 80–120 km. The position of the ionized region lower boundary may vary from 80 to 120 km, and electron density gradients may change several times.

Введение

Ионосфера Венеры была обнаружена в эксперименте радиопросвечивания, проведенном в 1967 г. с помощью космического аппарата (КА) «Mariner-5». Систематические исследования венерианской ионосферы проводились в период с 1975 по 1994 г. с помощью КА «Венера-9, -10» [1], «Pioneer-Venus» [2, 3], «Венера-15», -16 [4, 5], «Magellan» [6]. По результатам экспериментов радиопросвечивания было получено ~400 высотных распределений электронной концентрации при различных условиях освещенности Солнцем, что позволило исследовать основные закономерности поведения ионосферы Венеры. Но интерес к исследованию Венеры не уменьшается. В 2006 г. на ее орбиту был выведен КА «Venus-Express» [7], который проводит эксперименты радиопросвечивания и в настоящее время. К сожалению, большая часть данных зарубежных миссий недоступна для детального анализа с использованием наших новых технологий обработки.

Целью данной работы являлось получение новых сведений об ионосфере Венеры по данным двухчастотного радиопросвечивания с помощью КА «Венера-15, -16». Прогресс в теории радиовидения и в технике цифровой обработки сигналов обеспечил возможность исследования неизвестной слоистой структуры ионосферы Венеры благодаря применению более совершенных методов обработки. Высокая степень когерентности и стабильности радиосигналов с длинами волн 32 и 8 см КА «Венера-15, -16» позволила выполнить более точный анализ радиофизических параметров в ионосфере Венеры. Этому способствовало также то обстоятельство, что рефракция в ионосфере радиосигнала с длиной волны 32 см в шесть раз превышает рефракцию сигнала на длине волны 13 см, который используется в зарубежных исследованиях.

Методика измерений

Двухчастотное радиопросвечивание ионосферы было проведено в период с 12.10.1983 по

24.09.1984 г. при заходах КА «Венера-15, -16» за диск Венеры и при выходах из-за него. Антенна Центра дальней космической связи (г. Евпатория) принимала когерентные радиосигналы с длинами волн 8 (СМ) и 32 (ДМ) см; штатная аппаратура обеспечивала усиление, гетеродинирование и фильтрацию, а затем сигналы поступали по отдельным каналам в комплекс аппаратуры дисперсионного интерферометра [1]. Он осуществлял выделение сигналов методом калибровочного гетеродина, узкополосную фильтрацию с помощью следящих фильтров, построенных на базе ФАП, и измерение приведенной разности фаз с регистрацией на ленту самописца. В состав наземной аппаратуры была введена также цифровая система регистрации [4], принцип работы которой заключался в следующем. Сигналы ДМ ($1 \text{ кГц} \pm 50 \text{ Гц}$) и СМ ($4 \text{ кГц} \pm 100 \text{ Гц}$), поступающие с полосовых фильтров дисперсионного интерферометра, кодировались с помощью двухканального 8-разрядного аналого-цифрового преобразователя, что исключило относительные временные сдвиги двух когерентных сигналов. Частота дискретизации формировалась из водородного стандарта, и ее значение ~550 Гц было выбрано так, чтобы исключить эффекты наложения, возникающие при дискретизации узкополосных сигналов. Цифровые значения напряженности электромагнитного поля записывались на магнитную ленту.

Ранее, в 1984–1986 гг., по этим записям были измерены приведенные разности фаз сигналов и определены высотные профили электронной концентрации $N(h)$, которые позволили исследовать основные свойства ионосферы Венеры на высотах от 120 до 1000 км [4, 5]. В качестве примера на рис. 1 представлены распределения $N(h)$ для четырех зенитных углов Солнца Z_0 .

Результаты анализа $N(h)$ показали, что ионопауза – граница между ионосферой и солнечной плазмой – наблюдается, как правило, на уровне 250–300 км при малых Z_0 и на уровне 600–1000 км при больших Z_0 , но

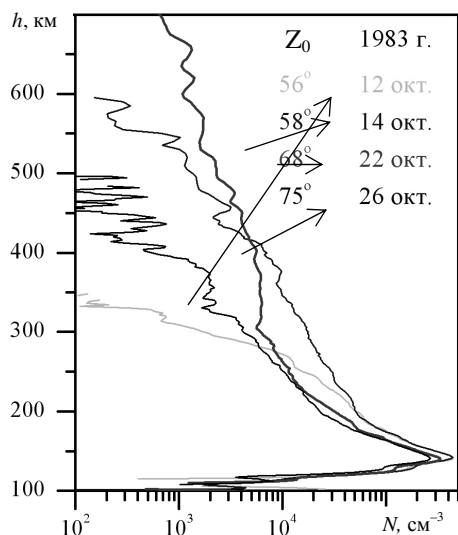


Рис. 1. Высотные профили электронной концентрации $N(h)$.

ее положение может изменяться на несколько сотен километров. Главный максимум ионизации дневной ионосферы располагается на высотах 138–148 км; при $Z_0=0^\circ$ он имеет электронную концентрацию $\sim 5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ в минимуме активности Солнца и $\sim 8 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ в максимуме активности. При малых Z_0 в области высот ~ 190 км формируется еще один максимум ионизации – аналог слоя F2 земной ионосферы. Нижний максимум ионизации в виде перегиба $N(h)$ -профиля находится на ~ 15 км ниже главного максимума и имеет электронную концентрацию $\sim 2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ при $Z_0=0^\circ$. С ростом Z_0 концентрация в главном и нижнем максимумах уменьшается по закону простого слоя. Ниже 130 км наблюдалось быстрое уменьшение $N(h)$ и предполагалось, что ниже ~ 115 км ионосферной плазмы нет.

Новое программное обеспечение позволило реализовать высокоточные вычисления амплитуд и приращений фаз ДМ- и СМ-сигналов с максимально возможным разрешением по времени, что позволило применить новую методику анализа радиозатменных данных, которая обеспечивает достоверное разделение влияния шума, ионосферы и атмосферы на результаты радиопросвечивания.

Приращение фаз сигналов позволяют измерить угол рефракции $\xi(t)$, а амплитуды сигналов – производную угла рефракции радиоволн, распространяющихся в ионосфере и атмосфере, в соответствии с приближенными соотношениями:

$$\xi(t) \approx \frac{c}{V_{\perp} f} [\Delta f(t) + \Delta F(t)],$$

$$\frac{d}{dt} \xi(t) \approx \frac{V_{\perp}}{L} [X(t) - 1],$$

где c – скорость света, L – расстояние между КА и перицентром линии прямой видимости КА, V_{\perp} – вертикальная компонента скорости захода или выхода КА, Δf – изменение частоты сигнала (с частотой несущей f) в ионосфере, ΔF – изменение частоты в верхней атмосфере, X – рефракционное ослабление мощности сигнала. В данном приближении

было показано, что вариации рефракционного ослабления должны быть прямо пропорциональны вариациям производной изменения частоты сигнала, обусловленного влиянием просвечиваемой среды:

$$X(t) \approx 1 + \frac{c}{f} \frac{L}{V_{\perp}} \frac{d}{dt} [\Delta f(t) + \Delta F(t)].$$

Чтобы исключить влияние атмосферы и движения КА, вычислялась приведенная разность частот в функции времени $\delta f(t)$ [4]. Тогда можно считать, что $\Delta f(t) \approx \delta f(t)$ определяется только влиянием плазмы на трассе радиосвязи.

На рис. 2 представлены результаты прецизионных измерений с шагом по времени 0.06 с: $X(t)$ для СМ- и ДМ-сигнала и вариации производной $\Delta f(t)$, которые прямо пропорциональны вариациям рефракционного ослабления ДМ-сигнала в соответствии с представленным соотношением. По вертикальной оси – высота линии прямой видимости КА над поверхностью Венеры h , по горизонтальной оси – шкала для $X(t)$ в относительных единицах, где 1 соответствует отсутствию влияния ионосферы и атмосферы. Из рис. 2 видно, что влияние ионосферы на СМ-сигнал не превышает уровень шума, а влияние рефракционного ослабления в атмосфере наблюдается ниже ~ 100 км. Влияние ионосферы на рефракционное ослабление ДМ-сигнала существенно превышает погрешности измерений. На высотах 150–180 км присутствуют три четко выраженных максимума $X(t)$, обусловленных сжатием лучевой трубки при прохождении ионизированных слоев с большими градиентами показателя преломления. Эти максимумы полностью совпадают с вариациями производной $\Delta f(t)$, но не коррелируют с вариациями $X(t)$ для СМ-сигнала, что свидетельствует о слоистой структуре ионосферы в высотном интервале 150–180 км. На высоте 128 км наблюдается сильная фокусировка радиолуча ДМ, обусловленная большим градиентом показателя преломления в области между главным и нижним максимумами $N(h)$. Следующий максимум на высоте 115 км обусловлен быстрым уменьшением концентрации электронов ниже области нижнего максимума $N(h)$. Но наиболее интересными являются

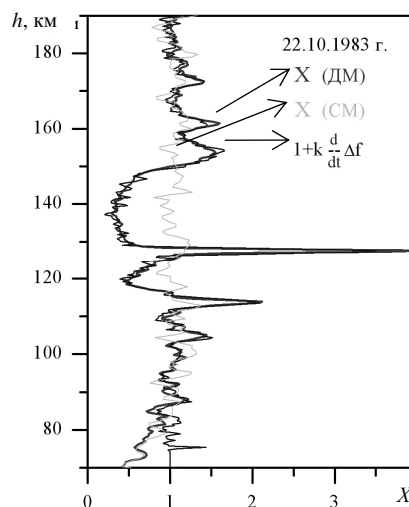


Рис. 2. Рефракционное ослабление X для ДМ- и СМ-сигналов и вариации производной Δf .

максимумы $X(t)$ на высотах 85, 88, 105 км, которые совпадают с вариациями производной $\Delta f(t)$. Такое совпадение однозначно свидетельствует о наличии ионизированных слоев на высотах 80–120 км. Обнаруженная корреляция вариаций $X(t)$ и $\Delta f(t)$ не может быть случайным совпадением, так как флуктуации шума для амплитуды и частоты радиосигнала имеют разную природу и полностью не коррелированы. Следует также отметить, что в области ниже ~100 км на рефракционное ослабление влияют и ионизированные слои, и атмосфера, но влияние атмосферы одинаковое для $X(t)$ ДМ- и СМ-сигналов и не проявляется на вариациях производной $\Delta f(t)$, а влияние ионизированных слоев не проявляется на $X(t)$ СМ-сигнала и одинаковое для вариаций производной $\Delta f(t)$ и $X(t)$ ДМ-сигнала.

Таким образом, применение новых технологий анализа данных радиопросвечивания КА «Венера-15, -16» позволило обнаружить слои ионосферной плазмы на высотах 80–110 км, которые не наблюдались ни в одной миссии к Венере.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ №07-02-00514-а и №06-02-17071-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров Ю.Н. и др. Дневная ионосфера Венеры по данным двухчастотного радиопросвечивания при помощи спутников «Венера-9, 10» // Радиотехника и электроника. 1978. Т. 23, № 9. С. 1840.
2. Cravens T.E., Kliore A.J., et al. The ionospheric peak on the Venus dayside // J. Geophys. Res. 1981. V. 86, N A13. P. 11,323.
3. Venus / Ed. D.M. Hunten. University of Arizona Press, 1983.
4. Савич Н.А. и др. Дневная ионосфера Венеры по данным радиозатмений спутников «Венера-15, -16» в 1983 г. // Радиотехника и электроника. 1986. Т. 31, № 11. С. 2113.
5. Гаврик А.Л., Самознаев Л.Н. Особенности дневной ионосферы Венеры в годы низкой и высокой активности Солнца // Космические исследования. 1987. Т. 25, № 2. С. 285–291.
6. Jenkins J.M., Steffes P.G., et al. Radio occultation studies of the Venus atmosphere with the Magellan spacecraft // Icarus. 1994. V. 110. P. 79–94.
7. Haeusler B. et al. VeRa experiment for Venus Express // Planet. Space Sci. 2006. V. 54, Iss.13–14. P. 1315–1335.

Институт радиотехники и электроники РАН, Москва