

Структура ионосферы Венеры по данным двухчастотного радиопросвечивания

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

Фрязинский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова Российской академии наук, 141190, г. Фрязино, Московская. обл., пл. Б.А. Введенского, д.1, e-mail: alg248@ire216.msk.su

Дано описание результатов радиопросвечивания ионосферы Венеры. Приведены экспериментальные данные, свидетельствующие о слоистой структуре ионосферы Венеры. Доказана возможность существования и однослойной, и двухслойной ночной ионосферы Венеры.

New results of radio occultation data handling is given. Experimental data showing the layer structure of the Venus ionosphere. The existence of single and double layer structure in the night time Venus ionosphere are proved.

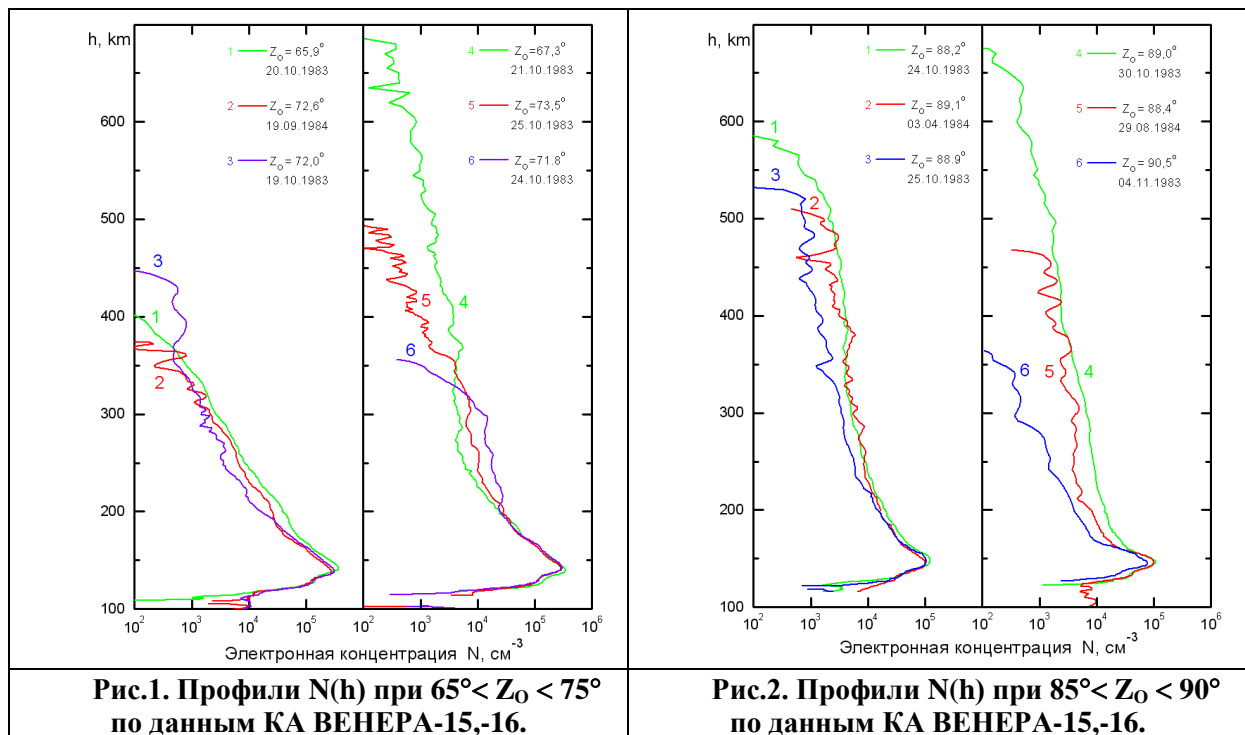
Радиопросвечивание ионосферы планеты возможно в тех случаях, когда излучающий сигналы космический аппарат (КА) заходит за диск планеты или выходит из-за него, а наземный пункт регистрирует измененные плазмой сигналы. Метод радиозатмений использует связь обусловленных средой изменений частоты и интенсивности радиоволн с углом рефракции, который, в свою очередь, связан с профилем показателя преломления ионосферы и, следовательно, с электронной концентрацией $N(h)$. Метод дисперсионного интерферометра, основанный на различии фазовых скоростей распространения радиоволн разных диапазонов в диспергирующей среде, устраняет вариации фазы сигнала, не связанные с влиянием плазмы, что увеличивает точность определения $N(h)$ при решении обратной задачи радиопросвечивания [1]. Новый метод диагностики слоистых структур использует адиабатический инвариант зондирующей системы для выделения слоистых структур ионизированной оболочки [2].

Цель работы – показать на примере результатов радиопросвечивания ионосферы Венеры сигналами КА ВЕНЕРА-15,-16 высокую эффективность использования сигнала L диапазона высокой мощности при реализации радиозатменных экспериментов в космических миссиях. Условия проведения просвечиваний ионосферы Венеры сигналами ДМ и СМ (длины волн 32 и 8 см) КА ВЕНЕРА-15,-16 изложены в работах [3-5]. Эти данные (170 сеансов) сопоставимы (в силу свойств метода радиозатмений) с данными просвечиваний КА ВЕНЕРА-9,-10, PIONEER-VENUS, MAGELLAN, VENUS-EXPRESS (всего ~650 сеансов). Совокупность данных является уникальным материалом для исследования влияния активности Солнца на характеристики ионосферы Венеры.

Электронная концентрация в ионосфере Венеры

Диапазон зенитных углов Z_0 в радиозатменных экспериментах КА ВЕНЕРА-15,-16 составил $50^\circ \dots 160^\circ$, получено 73 профиля $N(h)$ в дневной ионосфере, 20 профилей вблизи терминатора и 62 профиля в ночной ионосфере, эти результаты систематизированы и являются основой созданной базы данных, часть которой уже является общедоступной [6]. На рис.1,2 представлены типичные профили $N(h)$, найденные по данным КА ВЕНЕРА-15,-16 [3] для интервалов зенитных углов Солнца $65^\circ < Z_0 < 75^\circ$ (рис.1), $85^\circ < Z_0 < 90^\circ$ (рис.2). Разделение высотных профилей $N(h)$ на группы, в которых Z_0 меняется в небольших пределах, представляется целесообразным, учитывая как заметные отличия в поведении распределений $N(h)$ при различных Z_0 , так и их значительные временные вариации при близких Z_0 .

На приведенных зависимостях $N(h)$ можно выделить общие особенности, присущие всем распределениям $N(h)$ в дневной ионосфере Венеры независимо от Z_0 . Например, на всех $N(h)$ -профилях четко выражены основные области, формирование которых обусловлено различными физическими процессами в дневной ионосфере. В интервале высот $120 < h < 180$ км расположена область главного и нижнего максимумов ионизации, где определяющими являются фотохимические процессы [7]. При увеличении h от ~ 120 до ~ 140 км электронная концентрация растет и достигает своего наибольшего значения N_m , высота главного максимума меняется незначительно. Выше 180 км наблюдается увеличение плазменной шкалы высот профилей $N(h)$, обусловленное возрастающим влиянием процессов диффузии ионосферной плазмы [7]. Выше ~ 220 км, в верхней части дневной ионосферы вплоть до ионопаузы, основным процессом, определяющим распределение концентрации заряженных частиц, является диффузия, обусловленная градиентами давления ионизованного газа и силы тяжести [7]. Именно эта область ионосферы обнаруживает заметно выраженную изменчивость, т.к. на ее формирование оказывает значительное влияние набегающий поток солнечного ветра.



Физические механизмы формирования ночной ионосферы полностью отличаются от механизмов формирования дневной ионосферы. Значительная пространственно-временная изменчивость ночной ионосферы связана с вариациями потока плазмы с дневной стороны на ночную и потока надтепловых электронов, формирующих ионизованную область [8]. Пространственно-временные вариации этих потоков слабо изучены, поэтому представляет интерес сравнить $N(h)$ -профили, полученные почти одновременно в разных областях ионосферы или через сутки в близких областях (рис. 3). Два спутника Венеры позволили осуществить 9.11.1983 и 10.11.1983 по 4 сеанса просвечивания ночной ионосферы, орбиты оказались такие, что моменты захода и восхода разных КА отличались на ~ 3 ч. Зондируемые области при заходе КА ВЕНЕРА-15 и КА ВЕНЕРА-16 отличались на $\sim 2.5^\circ$, а при выходе на $\sim 8^\circ$ [4]. Сравнение попарно распределений (a,b), (c,d), (e,f), (g,h) рис.3 показывает, что количественные характеристики ноч-

ной ионосферы Венеры (максимальная концентрация, высотная протяженность, шкала высот, форма профиля и т.д.) за время $\Delta t \approx 3$ ч существенно изменяются.

В сеансах (a,b) и (c,d) зондируемые районы разнесены на ~ 200 км, это расстояние в 2 раза меньше длины пути радиолуча вблизи максимума $N(h)$ и различия $N(h)$ свидетельствуют об отсутствии стационарности ионосферы. Но есть и определенное сходство, в сеансах (a,b) область максимума $N(h)$ узкая с малой шкалой высот над максимумом, а в сеансах (c,d) область максимума $N(h)$ широкая, шкала высот над максимумом большая и в обоих сеансах четко выражена двухслойность $N(h)$. Определенное сходство заметно и через 24 ч: в сеансах (a,c) протяженность слоя ионосферы 230 км, в сеансах (b,d) она меньше 180 км. Похожие характеристики $N(h)$ могут указывать на сходство механизмов формирования основного тела ночной ионосферы, а различия $N(h)$ – на пространственную или временную изменчивость источников ионизации. На длительное (~ 24 ч) существование плазменных структур с похожими свойствами указывает сравнение сеансов (e,f) и (g,h), в которых области зондирования разнесены на ~ 800 км. Различия $N(h)$ достаточно большие, но во всех сеансах (e,f,g,h) протяженность основного тела ионосферы больше 250 км.

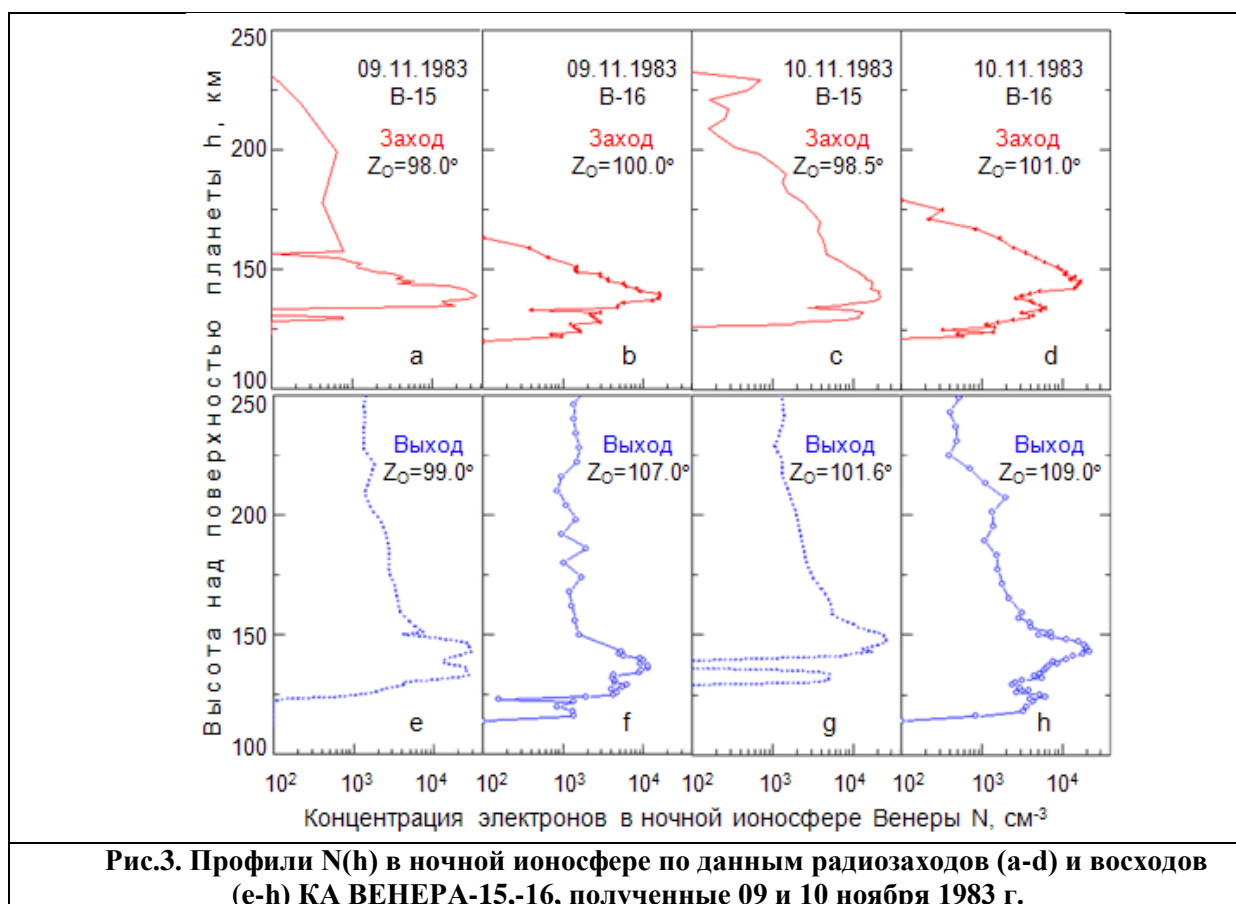


Рис.3. Профили $N(h)$ в ночной ионосфере по данным радиозаходов (a-d) и восходов (e-h) КА ВЕНЕРА-15,-16, полученные 09 и 10 ноября 1983 г.

Следует отметить, что из-за разной чувствительности к концентрации плазмы радиосигналов разных диапазонов могут возникать расхождения в выводах о закономерных вариациях $N(h)$ в разных экспериментах [1]. Для анализа достоверности полученных данных и выявления неизвестных свойств ионосферы необходимы новые методы, позволяющие достоверно анализировать слоистые разномасштабные структуры в системе атмосфера-ионосфера [9].

Применение метода диагностики слоистых структур в ионосфере

Наиболее полно достоинства сигнала L диапазона проявились после разработки метода диагностики плазменных слоев, использующего дисперсию радиоволн в плазме и теоретически обоснованную линейную связь возмущения энергетической экспозиции с изменением частоты радиоволны для увеличения чувствительности метода радиозатмений к малым вариациям концентрации электронов [2,9]. Разработанные критерии обеспечили разделение радиофизических эффектов, обусловленных влиянием плазмы, атмосферы и шума, что предоставило возможность выявления многослойных плазменных структур и в дневной, и в ночной ионосфере [2,9].

На рис. 4 представлены данные КА ВЕНЕРА-15,-16, свидетельствующие об эффективности нового направления исследований. Сравнение рефракционного ослабления ДМ сигнала $X_{DM}(t)$ с вычисленным ослаблением $X_{\Delta f}(t)=1+\beta*d/dt\{\Delta f(t)\}$ [2,8], представленное на рис. 4, указывает на отсутствие корреляции $X_{DM}(t)$ с $X_{\Delta f}(t)$ ниже 80 км, что свидетельствует об отсутствии влияния плазменных слоев, потому, что $\Delta f(t)$ зависит только от влияния плазмы. Разработанные критерии позволяют на высотах 80...110 км отделить плазменные эффекты от нарастающего в процессе погружения радиолуча влияния нейтральной атмосферы путем анализа $X_{DM}(t)$, $X_{CM}(t)$ и $X_{\Delta f}(t)$ [2,9]. Выше 80 км корреляция $X_{DM}(t)$ с $X_{\Delta f}(t)$ и многочисленные области фокусировки и расфокусировки радиолуча свидетельствуют о влиянии слоистых структур ионосферы.

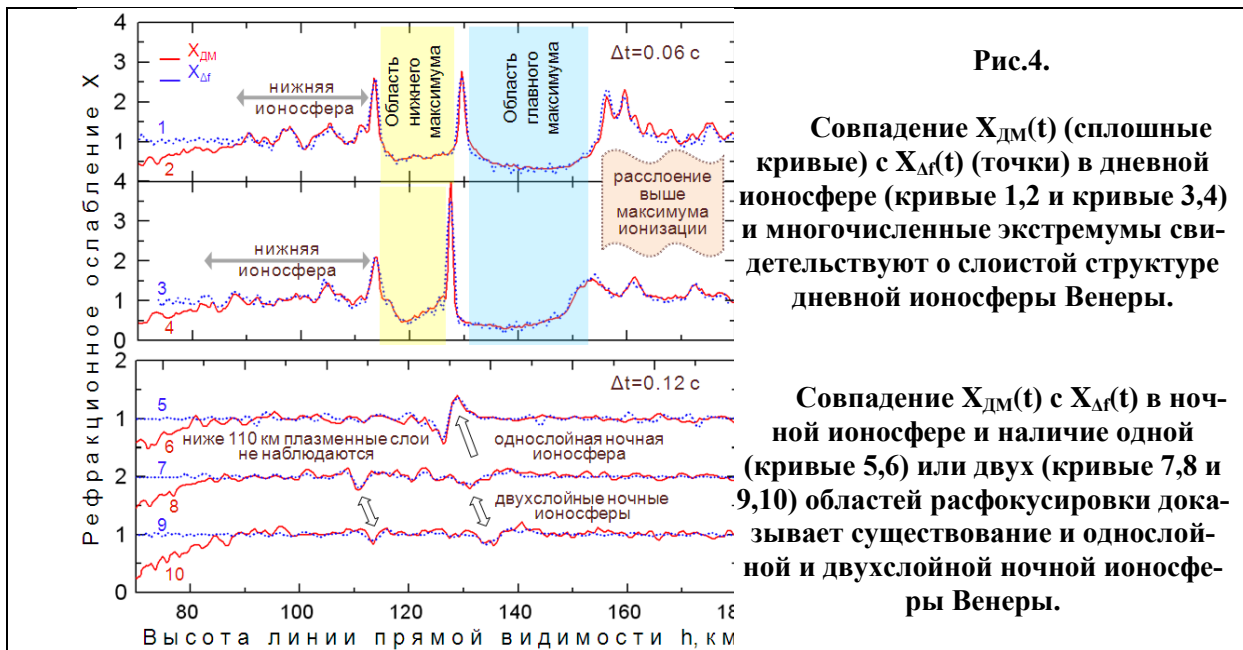


Рис. 4 доказывает существование плазмы на высотах 80...120 км в дневной ионосфере. Совпадение вариаций $X_{DM}(t)$ (кривые 2,4) с $X_{\Delta f}(t)$ (кривые 1,3) во всех сеансах просвечивания дневной ионосферы свидетельствует об обнаружении регулярно существующих нижних ионосферных слоев на высотах 80...120 км. При малых мешающих факторах нижняя область ионосферы наблюдалась во всех 19 сеансах для $56^\circ < Z_0 < 87^\circ$. В 7 сеансах из 9 при $87^\circ < Z_0 < 92^\circ$ нижняя ионосфера проявлялась, но эффект был сравним с шумами. Аналогичные структуры в ночной ионосфере во всех 25 сеансах при $92^\circ < Z_0 < 160^\circ$ отсутствуют. Обнаруженная нижняя часть дневной ионосферы Венеры может оказаться аналогом области D земной ионосферы.

Новая методика не только обнаружила отсутствие нижней части ночной ионосферы, но и доказала справедливость утверждений о существовании и однослойной, и

двухслойной ночной ионосферы. Ряд критиков полагали, что предположение о сферической симметрии ночной ионосферы необоснованно и два максимума на профилях $N(h)$, рассчитанных по традиционной методике, возникают из-за асимметрии ионосферы. Анализ результатов показал, метод радиозатмений эффективен, если в момент пересечения ионопаузы начинается увеличение интегральной электронной концентрации в процессе погружения луча в плазму, обусловленное увеличением произведения концентрации электронов и длины пути радиолуча в ионосфере. При погружении луча в цилиндрический шлейф ночной ионосферы с многомасштабными неоднородностями мешающие факторы превышают малые регулярные приращения фазы сигнала, что не позволяет его исследовать. Но в области основного тела ночной ионосферы, где нисходящий диффузионный поток ионов тормозится [8] из-за увеличения плотности атмосферы и растет концентрация электронов, создаются условия для образования сферически симметричной среды. Совпадение величины фокусировки $X_{DM}(t)$ с $X_{\Delta f}(t)$ на кривых 5-10 рис.8 является важным аргументом, подтверждающим достоверность использования предположения о локальной сферической симметрии в телесном угле 5° при расчетах профиля $N(h)$ на высотах $h < 200$ км и реальность существования как однослойной (кривые 5,6), так и двухслойной (кривые 7,8 и 9,10) ночной ионосферы Венеры.

Заключение

Показано, что высокое соотношение между исследуемыми радиофизическими эффектами и инструментальными шумами для сигнала L диапазона КА ВЕНЕРА-15,-16 позволило использовать разработанные методы и критерии для выделения радиофизических эффектов, обусловленных влиянием плазмы, на фоне влияния атмосферы и аппаратурного шума. Корреляция энергетических и неэнергетических параметров когерентных радиоволн оказалась новым эффективным средством выявления многослойных плазменных структур и в дневной, и в ночной ионосфере. Представленные результаты свидетельствуют о целесообразности использования сигнала L диапазона высокой мощности при реализации новых радиозатменных экспериментов в космических миссиях, что значительно увеличит точность определения ионосферных характеристик и обеспечит возможность получения неизвестной информации о тонкой структуре ионосфер планет.

*Авторы благодарны Н.А. Арманду за обсуждение части полученных результатов.
Работа выполнена при частичной поддержке программы ОФН РАН № VI.15.*

Литература

1. Гаврик А.Л. // Журнал радиоэлектроники. 2011. № 8. С. 1-19.
2. Гаврик А.Л., Гаврик Ю.А. и др. // Радиотехника и электроника. 2010. Т. 55. № 3. С. 277-284.
3. Савич Н.А., Андреев В.Е. и др. // Радиотехника и электроника. 1986. Т. 31. № 11. С. 2113.
4. Савич Н.А., Андреев В.Е. и др. // Радиотехника и электроника. 1986. Т. 31. № 3. С. 433-439.
5. Савич Н.А., Андреев В.Е. и др. // Космические исследования. 1986. Т. 24. № 3. С. 448-454.
6. A. L. Gavrik et al. // NASA Planetary Data System, 2010. <http://ppi.pds.nasa.gov/>
7. Савич Н.А., Гаврик А.Л. и др. // Космические исследования. 1983. Т. 21. № 5. С. 737-745.
8. Гаврик А.Л., Осмоловский И.К. и др. // Космические исследования. 1986. Т. 24. № 4. С. 620.

9. Гаврик А.Л., Гаврик Ю.А., Копнина Т.Ф. // Журнал радиоэлектроники. 2011. № 5. С. 1-18.