

Характеристики распределения электронов в ночной ионосфере Венеры по данным радиопросвечивания

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

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@hotmail.com

В работе исследованы свойства ночной ионосферы Венеры на основе данных двухчастотного радиопросвечивания миссии Венера-15,-16. Высокая точность анализа свойств ионосферы обеспечена высокой стабильностью и когерентностью радиоволн диапазонов 32 см и 8 см.

This work aims at obtaining useful properties of Venusian night ionosphere by re-examining dual-frequency occultation data from Venera-15,-16 mission. High precision analysis of ionosphere was ensured by high stability and coherence of radio signals with 32 cm and 8 cm wavelengths.

Достоинством экспериментов радиопросвечивания ионосферы Венеры является возможность получения долговременных однородных измерений ее параметров на высотах, которые малодоступны для исследования другими методами. В течение года наблюдений за сигналами спутников ВЕНЕРА-15,-16, зондировавших ионосферу в диапазоне зенитных углов от 50° до 160° [1,2], накоплен массив данных, анализ которых позволяет, с одной стороны, выбрать информацию для выявления возмущений ионосферы, с другой стороны, сделать заключение о существовании связи между характеристиками ионосферных аномалий и солнечного ветра. Интерпретацию радиоданных осуществляли в приближении геометрической оптики. Разделение эффектов ионосферы и атмосферы обеспечил метод дисперсионного интерферометра, основанный на различии фазовых скоростей распространения радиоволн двух диапазонов (8 и 32 см) в диспергирующей среде. Получены вариации разностной фазы когерентных сигналов, зависящие только от концентрации плазмы. Для решения обратной задачи радиопросвечивания и вычисления вертикального профиля концентрации электронов использованы известные интегральные соотношения [1,2]. Уникальность данных миссии ВЕНЕРА-15,-16 заключается в том, что эффекты влияния ионосферной плазмы выше, чем в зарубежных миссиях к Венере. Следовательно, можно получить более точные сведения об ионосфере, что особенно важно для изучения разреженных плазменных слоев ночной ионосферы.

Целью данной работы является получение новых сведений об ионосфере Венеры на основе применения усовершенствованных методов анализа результатов радиопросвечивания, выполненного спутниками ВЕНЕРА-15,-16, а также обоснование использованных приближений и оценка достоверности полученной информации.

Методика радиопросвечивания

В эксперименте бортовая антенна, расположенная на расстоянии L от области зондирования, излучает когерентные радиоволны (8 и 32 см) высокой мощности в направлении Земли. Наземная антенна улавливает колебания радиополя $u_0(t)$, их можно представить в комплексной форме, используя понятие аналитического сигнала с амплитудой $|u_0(t)|$ и фазой $\arg[u_0(t)]$. При обработке колебаний $u_0(t)$ использован метод дисперсионного интерферометра для исключения из сигнала $\lambda=32$ см доплеровского смещения, обусловленного взаимным движением передатчика и приемника [1,2]. Полученные квадратурные компоненты узкополосного сигнала $u(t)=A(t)\exp\{i\varphi(t)\}$ позволяют определить параметры $A(t)=|u(t)|$, $\varphi(t)=\arg[u(t)]$ с частотой дискретизации τ^{-1}

и вычислить усредненные на интервале времени τ функции мощности $P(t)=|u(t)|^2$ и фазы $\varphi(t)=\arg[u(t)]$ радиоволны, зондирующей ионосферу [3].

Поглощение и рассеяние радиоволн отсутствует, поэтому регистрируемая девиация мощности $P(t)$ обусловлена деформацией лучевых трубок при рефракции. Изменение мощности $X(t)=P(t)/P_0$ нормировано к ее среднему значению P_0 в отсутствии влияния исследуемой среды. Изменение фазы сигнала $\varphi(t)$ при перемещении передатчика на расстояние $h=Vt$ обусловлено деформацией поверхности волнового фронта радиополя вследствие пространственных вариаций показателя преломления среды $n(h)$, сквозь которую распространяется радиоволна (h – высота над поверхностью планеты, V – скорость захода спутника). Приращения фаз, определяемые по квадратурным компонентам сигнала $u(t)$ на интервале времени τ между измерениями, позволяют получить функцию $\varphi(t)$ суммированием этих приращений, но суммирование приводит к накоплению погрешности и затрудняет анализ вариаций на фоне монотонного изменения $\varphi(t)$. Поэтому необходимо не только суммировать приращения фазы, но и вычислять по приращениям фазы частоту сигнала $f(t)=\{\arg[u(t-\tau)]-\arg[u(t+\tau)]\}/(4\pi\tau)$. Полученное значение частоты $f(t)$ обусловлено доплеровским смещением вследствие рефракции радиоволны $\lambda=32$ см. Именно частота сигнала $f(t)=(2\pi)^{-1}\cdot d\varphi(t)/dt$ связана с углом рефракции $\xi(t) = f(t) \lambda V^{-1}$ в ионосфере, который, в свою очередь, связан [1-3] интегральным соотношением с высотным профилем электронной концентрации $N(h)$.

Следует отметить, что отраженный от поверхности Венеры сигнал имеет малую мощность и смещен вследствие эффекта доплера от зондирующего сигнала на сотни Гц, поэтому не влияет на точность определения параметров радиоволны. Концентрация электронов в ночной ионосфере не превышает 10^5 см⁻³, поэтому условия для появления каустик [4,5] отсутствовали и дифракционные эффекты не возникали.

Экспериментальные данные радиопросвечивания

Изменение интегральной электронной концентрации на пути радиолуча $\Delta N(t)$ прямо пропорционально изменению фазы сигнала $\varphi(t)$ [1,2]. При зондировании ночной ионосферы изменение $\Delta N(t)$ примерно в 10 раз меньше, чем при зондировании дневной ионосферы. Погрешность определения характеристик ионосферы зависит от превышения эффекта зондирования над случайными вариациями $\Delta N(t)$, которые всегда присутствуют на трассе распространения радиоволн. Именно этот фактор ограничивает достоверность сведений о ночной ионосфере.

Повысить точность решения обратной задачи можно, если устранить мешающие факторы. Для этого необходимо прогнозировать вариации $\Delta N(t)$ на контрольном участке. В миссии MARINER-5 проводили оценку вариаций $\Delta N(t)$, наблюдая за ее изменением в земной ионосфере [6]. Однако межпланетная плазма может вносить существенный, а часто основной вклад в случайные вариации $\Delta N(t)$ [7]. Используя два орбитальных спутника можно получить наиболее качественные результаты. Один спутник просвечивает ионосферу, а другой измеряет мешающие вариации $\Delta N(t)$, что было реализовано в миссии ВЕНЕРА-9,-10 [8]. Но таких экспериментов мало.

На рис. 1 представлены вариации $\Delta N(t)$ при радиозондировании ночной ионосферы Венеры. По таким измерениям $\Delta N(t)$ мы пытаемся определить высоту ионопаузы и прогнозировать мешающее влияние плазмы на трассе связи, чтобы его уменьшить. Это непростая задача, мешающие факторы могут быть сравнимы по величине с эффектом ночной ионосферы (например, рис. 4б). Тем не менее, мы решаем обратную задачу и по частоте сигнала $f(t)$ находим профили электронной концентрации, показанные на рис. 2.

В радиозатменных экспериментах миссии *Венера-15,-16* получено 73 профиля $N(h)$ в дневной ионосфере, 20 профилей вблизи терминатора и 62 профиля в ночной ионосфере [3]. Профили $N(h)$, полученные в разных миссиях: ВЕНЕРА-9,-10 [8],

PIONEER VENUS [9], ВЕНЕРА-15,-16 [1,2], MAGELLAN [10], VENUS EXPRESS [11], не противоречивы, они демонстрируют сильную изменчивость и отсутствие четких закономерностей. Максимальная электронная концентрация изменяется от тысяч до десятков тысяч частиц, но протяженность ионосферы нельзя определить из-за того, что плазменный шлейф ночной ионосферы [9] не является сферически слоистым.

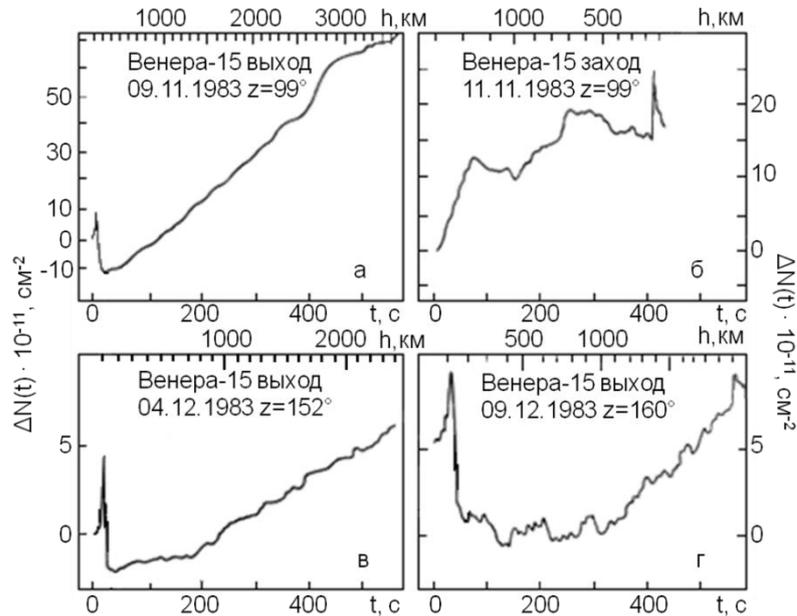


Рис.1. Изменения $\Delta N(t)$ при радиопросвечивании ночной ионосферы Венеры, полученные в 1983 г. с помощью спутника ВЕНЕРА-15 при разных зенитных углах z

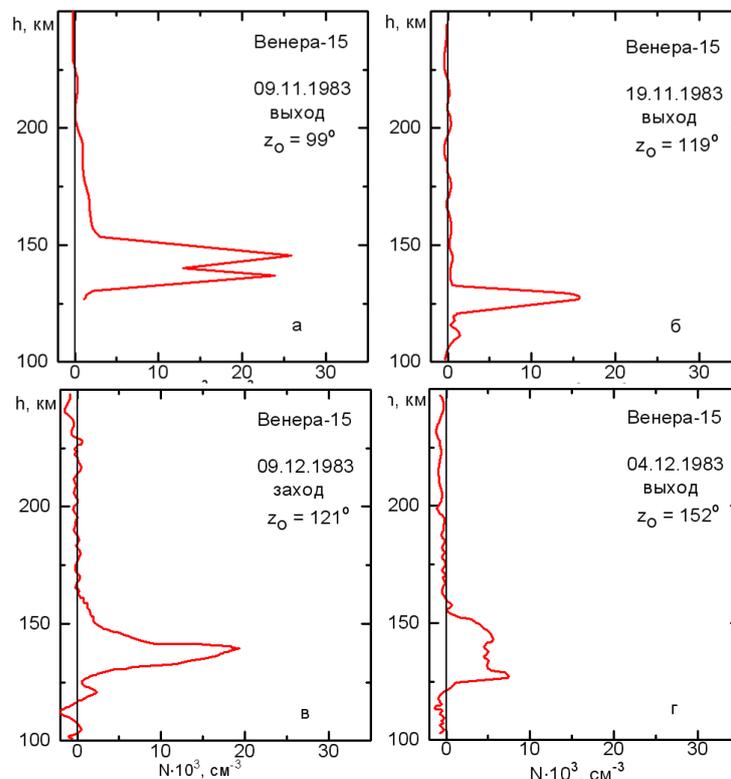


Рис.2. Профили электронной концентрации $N(h)$ ночной ионосферы Венеры, полученные в 1983 г. с помощью спутника ВЕНЕРА-15 при разных зенитных углах z

Характеристики профилей электронной концентрации

Возникает вопрос – можно ли считать полученные профили $N(h)$ достоверными в области максимальной ионизации, где данные радиопросвечивания сравнить не с чем, т.к. других измерений нет. Мы полагаем ночную ионосферу сферически слоистой в области максимальной ионизации. Почему? Концентрация нейтральной атмосферы на несколько порядков превышает концентрацию ионов и электронов. Нейтральная атмосфера стратифицирована полем тяжести, поэтому она сферически слоистая в узкой области просвечивания шириной 5^0 . Область максимальной ионизации формируется под действием нисходящего потока ионов O^+ , которые перетекают с дневной стороны и опускаются в атмосферу [9]. Плотность атмосферы нарастает с уменьшением высоты и частота столкновений ионов O^+ с нейтралами увеличивается, поэтому при $h < 200$ км распределение заряженных частиц приобретает свойство атмосферы – становится сферически слоистым в малой области просвечивания. Если предположить, что в ограниченной области просвечивания существует горизонтальный линейный градиент концентрации, то вариации $\varphi(t)$ будут такие же, как при зондировании сферически симметричной среды. Действительно, радиолуч пересекает каждый слой плазмы дважды относительно перпендикуляра к радиолучу, поэтому линейное увеличение концентрации в одной части слоя полностью компенсирует уменьшение концентрации во второй части этого слоя, т.е. не влияет на результат определения $\Delta N(t)$.

Можно ли проверить отсутствие нелинейных градиентов? Оказалось, что у сферической слоистой среды есть важное свойство [12]. В эксперименте радиопросвечивания прозрачной газовой оболочки планеты, стратифицированной полем тяжести, изменение плотности потока энергии прямо пропорционально градиенту угла отклонения волнового вектора от первоначального направления, если применима геометрическая оптика. Поэтому зарегистрированные вариации мощности радиоволны $X(t) = I + \lambda L V^{-2} df(t)/dt$ прямо пропорциональны скорости изменения ее частоты, а случайные флуктуации этих параметров сигнала некоррелированы [12]. Обнаруженное свойство радиозатменного эксперимента можно выявить только в сферически слоистой среде, если уровень аппаратного шума низкий, отсутствуют дифракционные эффекты, нет поглощения и рассеяния радиоволн.

Экспериментальные данные, представленные на рис. 3, подтверждают совпадение измеренных значений $X(t)$ с вычисленными по $df(t)/dt$ значениями $X_f(t)$, которые зависят только от концентрации электронов. В дневной ионосфере (верхний график) вариации $X(t)$ и $X_f(t)$ согласуются, они существенно превышают шум, кроме того, совпадающие вариации $X(t)$ и $X_f(t)$ можно наблюдать вплоть до $h=85$ км [12]. Вблизи терминатора вариации $X(t)$ и $X_f(t)$ уменьшаются. В ночной ионосфере вариации $X(t)$ и $X_f(t)$ лишь незначительно превышают шум, на высотах $h > 150$ км флуктуации $X(t)$ и $X_f(t)$ не коррелируют, т.к. шум превышает эффект ионосферы, а в области максимальной ионизации видно хорошее совпадение кривых $X(t)$ и $X_f(t)$. Максимум ионизации находится вблизи минимума $X_f(t)$. Наличие одного или двух минимумов $X_f(t)$ указывает на существование однослойной или двухслойной ночной ионосферы, совпадение вариаций $X(t)$ и $X_f(t)$ доказывает достоверность полученных результатов.

Ниже 105 км ни в одном сеансе радиопросвечивания ночной ионосферы нет совпадающих вариаций $X(t)$ и $X_f(t)$, в то время как в дневной нижней ионосфере мы постоянно наблюдали совпадающие вариации $X(t)$ и $X_f(t)$ вплоть до $h=85$ км [12]. Отсутствие на ночной стороне Венеры существенных вариаций $X(t)$ и $X_f(t)$ ниже 105 км указывает на то обстоятельство, что нижние слои дневной ионосферы похожи по свойствам на область Д земной ионосферы, они регулярно присутствуют на освещенной стороне и исчезают ночью, т.е. не могут быть следствием только метеорной ионизации.

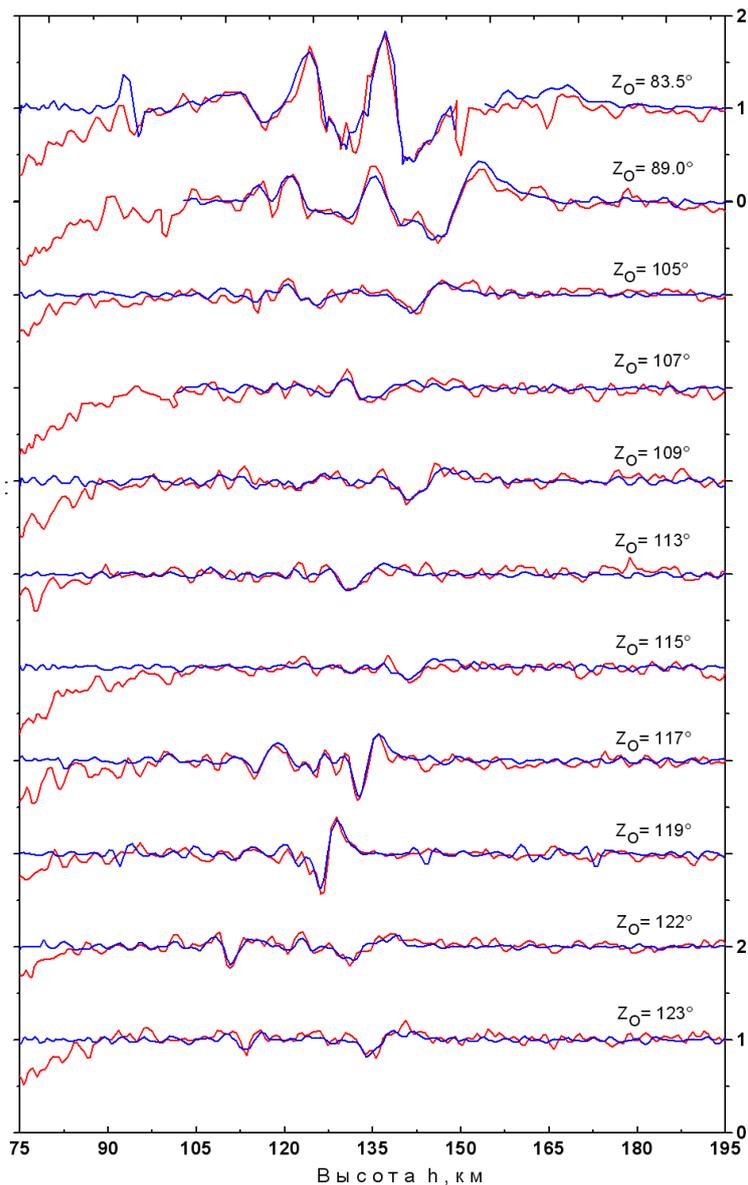


Рис.3. Сравнение $X(h)$ (красная кривая) с рассчитанной функцией $X_r(h)$ (синяя кривая). Данные ВЕНЕРА-15,-16, полученные в 11 сеансах просвечивания ионосферы, сдвинуты по оси ординат на 1. Отсутствие корреляции $X(h)$ с $X_r(h)$ свидетельствует об отсутствии плазмы на ночной стороне при $h < 105$ км

Методом радиопросвечивания мы не выявили ионопаузу, плазменный шлейф и метеорные слои в ночной ионосфере. Но в области высот 100...200 км над поверхностью Венеры метод радиопросвечивания позволил изучить область максимальной ионизации, информацию о которой трудно получить другими методами.

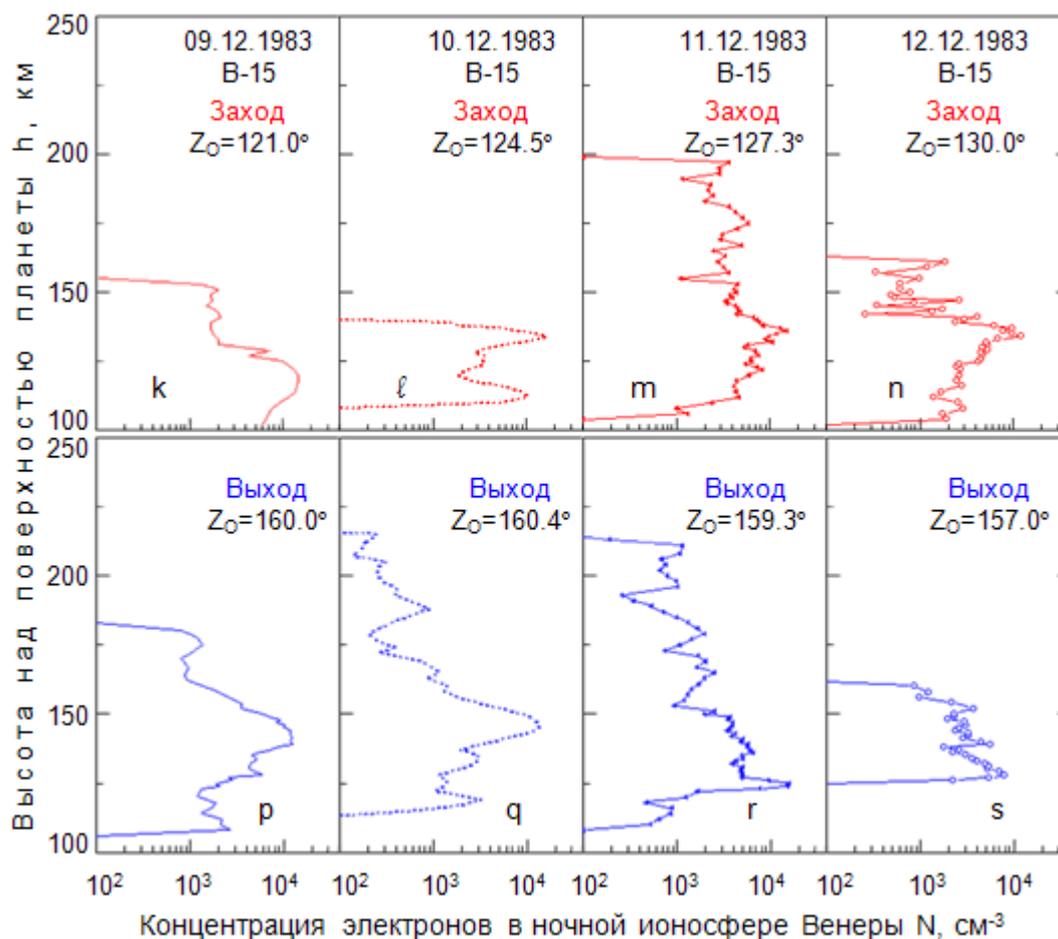


Рис. 4. Профили $N(h)$ в ночной ионосфере по данным радиозаходов (к-н) и восходов (р-с) КА ВЕНЕРА-15, полученные с 09 по 12 декабря 1983 г

Профили $N(h)$ на рис. 4 демонстрируют ряд характеристик ночной ионосферы. Возможность длительного (~24 ч) существования ряд плазменных структур с похожими свойствами подтверждает сравнение попарно сеансов (m,n), (p,q), (r,s) рис. 4. В сеансах (k,l) структура $N(h)$ не имеет сходства ни с одним из представленных профилей. На рис. 4 видно, что в сеансах (p,q) характеристики профилей $N(h)$ очень похожи, а это свидетельствует о стабильности источников ионизации в течение 24 часов. Затем, 11.12.1983 г., свойства источника ионизации ночной ионосферы изменились: структура профилей $N(h)$ в сеансах (r,s) существенно отличается от структуры $N(h)$ в сеансах (p,q). Если принять во внимание, что значения $N(h)$ ниже уровня 10^3 см^{-3} могут быть искажены мешающими факторами, то соответствие структуры и шкалы высот профилей $N(h)$ на рис. 4 (r,s) подтверждает существование достаточно стабильных во времени источников ионизации. Определенное сходство структуры и шкалы высот профилей $N(h)$ также видно на рис. 4 (m,n).

Следует отметить пространственную нерегулярность источников ионизации. Местоположение зондируемых областей в сеансах (k,p), (l,q), (m,r), (n,s) смещено на 50° по широте, а задержка времени зондирования составляет 10...15 мин. Различия $N(h)$ в сеансах (k,p) и (l,q) очевидны. В сеансах (m,r) и (n,s) согласуются высотная протяженность основного тела ночной ионосферы и изрезанная структура $N(h)$, но форма профилей $N(h)$ вблизи максимума ионизации существенно различается. Следовательно, распределение источников ионизации в разных областях ночной ионосферы не является однородным. Неоднородное в пространстве распределение

источников ионизации может быть стабильным в течение 24 часов (например, сеансы (m,r), (n,s) рис. 4). Однако профили $N(h)$ сеансов (k,p), (l,q) рис. 4 указывают на то, что в одной области ионосферы в сеансах (p,q) источники ионизации стабильные, в то время как в другой области в сеансах (k,l) они нестабильные.

Пространственно-временные вариации $N(h)$ могут быть следствием вариаций параметров потоков плазмы с дневной стороны на ночную и потоков надтепловых электронов, формирующих ночную ионосферу [9]. Изменение потока ионов O^+ из-за влияния солнечного ветра может быть главным фактором вариаций $N(h)$ в области тени и тогда закономерности вариаций характеристик $N(h)$ будут зависеть от параметров солнечного ветра, а не от величины зенитного угла Солнца z . Для изучения этого вопроса необходимо выполнить совместный анализ данных радиопросвечивания и данных измерения параметров солнечного ветра вблизи Венеры, что может быть реализовано в планируемой миссии ВЕНЕРА-Д [13,14].

Заключение

Показано, что метод радиозатмений наиболее эффективен при излучении с борта спутника радиоволны L диапазона (например, $\lambda=32$ см) высокой мощности. Благодаря высокому соотношению между исследуемыми радиофизическими эффектами и инструментальными погрешностями можно наиболее достоверно определять параметры плазменной оболочки планеты при решении обратной задачи двухчастотного радиопросвечивания и выявлять возмущения ионосферы, связанные с изменением параметров солнечного ветра и излучения Солнца.

Показано, что наиболее полно достоинства сигнала L диапазона выявляются в методе детектирования плазменных слоев, использующем дисперсию радиоволн в плазме и выявленную линейную связь между рефракционным изменением мощности радиоволны и скоростью изменения ее частоты для увеличения чувствительности метода радиозатмений к малым вариациям концентрации электронов.

Показано, что в ночной ионосфере Венеры вертикальная структура электронной концентрации на высотах 110...180 км может сохраняться в течение 24 часов, что указывает на существование долговременной стабильности источников ее ионизации при отсутствии солнечного излучения.

Работа выполнена при частичной поддержке программы № 1.7П Президиума РАН.

Литература

1. Савич Н.А., Андреев В.Е., Вышлов А.С. и др. Ночная ионосфера Венеры по данным двухчастотного радиопросвечивания при помощи спутников "Венера-15,16" в 1983 г. // Радиотехника и электроника. 1986. Т. 31. № 3. С. 433-439.
2. Савич Н.А., Андреев В.Е., Вышлов А.С. и др. Полярная ионосфера Венеры вблизи терминатора планеты по радиозатменным данным спутников "Венера-15,16" // Космические исследования. 1986. Т. 24. № 3. С. 448-454.
3. Гаврик А.Л., Гаврик Ю.А., Копнина Т.Ф., Самознаев Л.Н. Вариации амплитуд и частот когерентных радиосигналов при просвечивании дневной ионосферы Венеры // Радиотехника и электроника. 2010. Т. 55. № 3. С. 277-284.
4. Лукин Д.С., Школьников В.А., Спиридонов Ю.Г., Фоминых С.И. Рефракция радиоволн и напряженность поля в атмосфере Венеры // Космические исследования №6, 1969
5. Крюковский А.С., Лукин Д.С., Палкин Е.А., Растягаев Д.С. Волновые катастрофы - фокусировки в дифракции и распространении электромагнитных волн // Радиотехника и электроника. 2006. Т. 51. № 10. С. 1155-1192.

6. Kliore A.J., Levy G.S. et.al. Atmosphere and ionosphere of Venus from the Mariner 5 S-band radio occultation measurements // Science. 1967. V. 158. № 3809. P. 1683-1688.
7. Савич Н.А., Азарх С.Л., Вышлов А.С. и др. Флуктуации частоты когерентных радиосигналов в окосолнечной плазме по данным аппаратов "Венера-15,16" // Космические исследования. 1987. Т. 25. № 2. С. 243-250.
8. Александров Ю.Н., Васильев М.Б., Вышлов А.С. и др. Предварительные результаты двухчастотного радиопросвечивания ночной ионосферы Венеры при помощи спутников "Венера-9,10" // Доклады АН СССР. 1976. Т. 229. № 1. С. 55.
9. Brace L.H., Kliore A.J. The structure of the Venus ionosphere // Space Science Reviews. V. 55. Jan.-Feb. 1991. P. 81-163.
10. Jenkins, J.M., P.G. Steffes, D.P. Hinson et al. Radio occultation studies of the Venus atmosphere with the Magellan spacecraft: 2. Results from the October 1991 experiments // Icarus. 1994. V. 110. P. 79-94.
11. Pätzold M., Tellmann S., Häusler B., et.al. A sporadic layer in the Venus lower ionosphere of meteoric origin // Geophysical Research Letters. 2009. V. 36. L05203.
12. А.Л. Гаврик, Ю.А. Гаврик, Т.Ф. Копнина, Е.А. Кулешов. Осцилляции вблизи нижней границы ионосферы Венеры по радиозатменным данным спутников "Венера-15,-16" // Радиотехника и электроника. 2013. Т. 58. № 10. С. 1013-1024.
13. Засова Л.В. и члены JSDT. О ходе работ по проекту «Венера-Д» / Совет РАН по космосу. 07.07.2016. http://sovet.cosmos.ru/files/2016_0707/p3-pvd.pptx
14. Засова Л.В. Проект ВЕНЕРА-Д // Механика, управление и информатика. 2014. Т. 6. № 4 (49). С. 255-267.