

Характеристики распределения электронов в дневной ионосфере Венеры по данным радиопросвечивания

А.Л. Гаврик

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 дневной 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 day-time 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.

Введение

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 позволил, с одной стороны, выбрать информацию для выявления возмущений ионосферы, с другой стороны, сделать заключение о существовании связи между характеристиками процессов на Солнце и в ионосфере. Интерпретацию радиоданных осуществляли в приближении геометрической оптики. Разделение эффектов ионосферы и атмосферы обеспечили методом дисперсионного интерферометра, основанным 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 на трассе радиосвязи. Для решения обратной задачи радиопросвечивания и вычисления вертикального профиля концентрации электронов использованы известные интегральные соотношения. 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 в нижней дневной ионосфере [3].

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, излучала когерентные радиоволны (8 и 32 см) высокой мощности в направлении Земли. Наземная антенна улавливала 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 [4]. Следует отметить, что отраженный от поверхности Венеры сигнал имел малую мощность и был смещен вследствие эффекта доплера от зондирующего сигнала на сотни Гц, поэтому не влиял на точность определения параметров радиоволны. Полученные квадратурные компоненты узкополосного сигнала $u(t)=A(t)\exp\{i\varphi(t)\}$ позволили 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 [4].

Поглощение и рассеяние радиоволн не выявили, поэтому зарегистрированная девиация мощности $P(t)$ обусловлена деформацией лучевых трубок при рефракции. Изменение мощности $X(t)=P(t)/P_0$ нормировали к ее среднему значению P_0 , полученному 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 распространялась 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, позволили получить функцию $\varphi(t)$ суммированием этих приращений, но суммирование приращений может привести к накоплению погрешности, что затруднит 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 [3,4] интегральным соотношением с высотным профилем электронной концентрации $N(h)$.

Источники погрешностей метода радиозатмений

Одна из главных причин ограничения точности радиозатменных данных – инструментальный шум, величина которого зависит от характеристик радиосистемы, а при высокой стабильности аппаратуры от энергетического потенциала радиолинии. Высокое отношение сигнал/шум при регистрации сигналов уменьшает случайные флуктуации мощности, фазы и частоты принимаемых радиоволн, что обеспечивает повышение чувствительности и разрешающей способности метода радиопросвечивания (чем выше энергия сигнала по сравнению с уровнем шума, тем точнее измерения параметров радиополя на коротких интервалах времени, на основе которых определяют характеристики просвечиваемой среды) [3,4]. Следует отметить, что случаи нарушения условий геометрической оптики и появления каустик [5,6] мы не рассматриваем.

Главным источником погрешностей метода радиозатмений могут быть вариации концентрации межпланетной плазмы и земной ионосферы на трассе распространения радиоволн между КА и наземным пунктом радиосвязи [7]. Величина такого шума зависит от длины трассы радиосвязи, от расстояния между радиотрассой и Солнцем, от состояния плазменных неоднородностей на пути радиоволн в межпланетном пространстве и ионосфере Земли. Флуктуации амплитуды и частоты радиоволн могут возрастать на порядок и более при неблагоприятных условиях проведения эксперимента, когда возмущения плазмы на трассе радиосвязи существенные.

При благоприятных условиях проведения эксперимента преобразование экспериментальных данных в параметры атмосферы и ионосферы путем решения обратной задачи также может исказить сведения о вариациях показателя преломления среды из-за использования интегральных соотношений. Методические погрешности интегрирования экспериментальных данных, содержащих шум, и возможная асимметрия зондируемой среды могут снизить качество сведений об ионосфере, в частности, вблизи нижней границы дневной ионосферы Венеры [8], что ограничит возможность обнаружения и исследования процессов, ответственных за динамические изменения в системе *атмосфера-ионосфера*.

Распределение электронов в дневной ионосфере

Использование известной методики решения обратной задачи радиопросвечивания позволило экспериментально выявить основные свойства ионосферы Венеры, а апробированная модель формирования дневной ионосферы [9,10] (аналогичная модели земной ионосферы) указала на преобладающие физико-химические процессы в разных областях. Отметим, что разделение ионосферы на области D, E, F1, F2 появилось при изучении земной ионосферы и связано с существованием больших вертикальных градиентов электронной концентрации, указывающих на слоистую, приблизительно горизонтально стратифицированную структуру ионосферы [11]. Физический смысл разделения ионосферы на области D, E, F1, F2 отражает наиболее общий характер физико-химических процессов в каждом слое, результаты этих процессов могут быть описаны не только качественно, но и выражены количественно. Чтобы сохранить традиционный физический смысл разделения ионосферы на слои с преобладающими физико-химическими процессами мы обозначим слои на Венере по аналогии с земной ионосферой следующим образом: vF2, vF1, vE, vD. На рис. 1 представлены профили электронной концентрации в ионосфере Венеры, на основе которых выполнено моделирование ионного состава ионосферы.

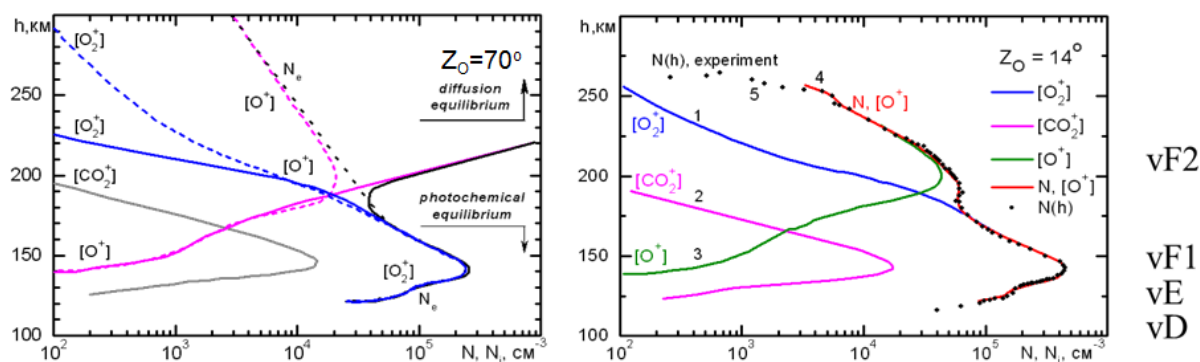


Рис. 1. Распределение ионов и электронов в дневной ионосфере Венеры. Левая панель; результаты расчетов O^+ , O_2^+ , CO_2^+ , N_e в приближении фотохимического равновесия и с учетом диффузии для зенитного угла Солнца 70° . Правая панель; результаты расчетов O^+ , O_2^+ , CO_2^+ , N_e с учетом диффузии для зенитного угла Солнца 14° .

При моделировании состояния ионосферы Венеры решали численным итерационным методом систему дифференциальных уравнений, описывающих процессы диффузии и ионизации, а также аэрономические реакции, протекающие в ионосфере [9]. На левой панели рис. 1 видно, что при отсутствии диффузии плазмы можно было бы получить экспоненциальный рост концентрации электронов выше 190 км, обусловленный уменьшением скорости рекомбинации ионов O^+ . Однако на Венере влияние диффузии становится заметным выше 160 км, в области уменьшения

электронной концентрации. Поэтому структура дневной ионосферы Венеры отличается от земной ионосферы, в которой максимум $N(h)$ образуется в области F2 после экспоненциального увеличения $N(h)$ [11].

Уже первые данные КА Mariner-5 и Mariner-10 [12] показали, что главный максимум ионизации дневной ионосферы Венеры на высоте ~ 142 км обусловлен влиянием ультрафиолетового излучения Солнца $< 1000 \text{ \AA}$, он является аналогом слоя F1 земной ионосферы. Нижний максимум ионизации, заметный в виде перегиба на профилях $N(h)$ на высоте ~ 135 км, обусловлен влиянием рентгеновского участка спектра излучения Солнца $10 \dots 100 \text{ \AA}$, он является аналогом слоя E земной ионосферы. Оба этих слоя формируются в условиях фотохимического равновесия. Серия профилей $N(h)$, полученная по данным радиозатмений КА Венера-9,-10, позволила установить возможность существования еще одного максимума $N(h)$ выше 180 км в области доминирования процессов диффузии. Этот аналог слоя F2 земной ионосферы [9] достаточно редко образуется в виде небольшого по величине локального максимума $N(h)$ (правая панель рис. 1), а в большинстве сеансов влияние диффузии плазмы приводит лишь к изменению шкалы высот профиля $N(h)$ выше 180 км (левая панель рис. 1). Данные КА Венера-15,-16, позволили выявить еще одну ионизованную область в диапазоне высот 85-115 км [13], которая, по-видимому, является аналогом области D земной ионосферы. Однако процессы образования этой области еще не исследованы. Кроме того, погрешность определения $N(h)$ в областях vF2, vF1, vE, vD разная, что обусловлено методикой расчета $N(h)$, основанной на интегрировании данных, искаженных широкополосным шумом, и именно в области vD трудно определить достоверное распределение концентрации электронов вследствие большой погрешности расчета $N(h)$ [8]. Радиозатменные данные миссий Pioneer-Venus [14], Magellan [15], Venus-Express [16], Akatsuki [17] не противоречат представленным сведениям.

Экспериментальные результаты радиопросвечивания являются основой для изучения закономерностей формирования ионосферы Венеры и исследования ее изменчивости во времени и в пространстве. Показано, что уменьшение освещенности ионосферы приводит к закономерному уменьшению плотности плазмы. Концентрация электронов в максимуме ионизации закономерно уменьшается от $5 \cdot 10^5$ до $3 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ при увеличении зенитного угла Солнца от 50° до 100° . Установлено, что максимальная концентрация электронов растет пропорционально увеличению интенсивности солнечного излучения, флуктуации концентрации относительно эмпирической зависимости в дневной ионосфере составляют $\sim 4\%$ при малой активности Солнца и увеличиваются до $\sim 15\%$ при высокой активности. Высота верхней границы ионосферы в среднем растёт по мере увеличения солнечной активности, она нестационарная, на освещенной стороне она изменяется от ~ 250 до ~ 1000 км, она максимальна в области терминатора. Показано, что при изменении условий освещенности Солнцем изменяются не только количественные характеристики $N(h)$ -профилей, но и форма профилей, их качественная структура. Обнаруженная нижняя часть ионосферы (с концентрацией электронов 10^3 - 10^4 см^{-3}) на высотах 80-110 км четко проявляется на дневной стороне, становится мало заметной вблизи терминатора, а на ночной стороне подобная область не наблюдается. Выявленное уменьшение радиофизических проявлений нижней ионосферы с приближением к области терминатора и их исчезновение на неосвещенной стороне исключает предположение о метеорной природе нижней области ионосферы, необходимо искать другие физические механизмы, ответственные за образование этой области. В области терминатора на $N(h)$ -профилях чередуются проявления характерных особенностей, наблюдавшихся в дневной и в ночной ионосфере, т.к. физические механизмы формирования дневной и

ночной ионосферы различаются. 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 (как в дневной ионосфере). Когда на образование ионосферы существенное влияние оказывает процесс перетекания плазмы через терминатор с дневной на ночную сторону, распределения $N(h)$ меняются, появляются профили $N(h)$ с двумя максимумами, в которых концентрации сравнимы по величине (как в ночной ионосфере).

Заключение

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 пространственно-временные 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. Этот метод позволил обнаружить нижнюю часть ионосферы (область νD), для ее изучения необходимо выполнить совместный анализ данных радиопросвечивания и данных измерения датчиками параметров атмосферы и солнечного ветра вблизи Венеры, что может быть реализовано в планируемой миссии ВЕНЕРА-Д [18].

Работа выполнена при частичной поддержке программы № 28 Президиума РАН.

Литература

1. 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.
2. 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.
3. Гаврик А.Л., Гаврик Ю.А., Копнина Т.Ф., Кулешов, Е.А. Осцилляции вблизи нижней границы ионосферы Венеры по радиозатменным данным спутников "Венера-15,-16" // Радиотехника и электроника. 2013. Т. 58. № 10. С. 1013-1024.
4. Гаврик А. Л., Бондаренко М. И, Смыслов А. А., Копнина Т. Ф. Метод диагностики слоистых структур в атмосфере и ионосфере по данным радиопросвечивания. // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №11. С.7. <http://jre.cplire.ru/jre/nov17/9/text.pdf>
5. Лукин Д.С., Школьников В.А., Спиридонов Ю.Г., Фоминых С.И. Рефракция радиоволн и напряженность поля в атмосфере Венеры // Космические исследования №6, 1969
6. 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.

7. Гаврик А.Л., Вышлов А.С., Дорожук О.Н., и др. Измерение вариаций интегральной электронной концентрации на трассах связи со станциями "Венера-13" и "Венера-14" // Космические исследования. 1983. Т. 21. № 3. С. 445-448.
8. Гаврик А. Л. Погрешности определения электронной концентрации при решении обратной задачи радиопросвечивания дневной ионосферы Венеры // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал] 2018. №9. <http://jre.cplire.ru/jre/sep18/2/text.pdf>
9. Савич Н.А., Гаврик А.Л., Самознаев Л.Н. Анализ диффузионных процессов в дневной ионосфере Венеры по данным радиозатмений спутников "Венера-9,10" // Космические исследования. 1983. Т. 21. № 5. С. 737-745.
10. Chen R.H., Nagy A.F. A comprehensive model of Venus ionosphere // J. Geophys. Res. 1978. V. 83. № 5. A3. P. 1133.
11. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 528 с. ISBN 5-02-000716-1.
12. G. Fjeldbo, B. Seidel, D. Sweetnam, T. Hovard. The Mariner 10 Radio Occultation Measurements of the Ionosphere of Venus. // Journal of the Atmospheric Sciences. 1975. V. 32. N. 2. P. 1232-1236.
13. Гаврик А.Л., Павельев А.Г., Гаврик Ю.А. Обнаружение ионосферных слоев в дневной ионосфере Венеры на высотах 80-120 км по результатам двухчастотного радиопросвечивания КА Венера-15,-16 // Солнечно-земная физика. 2008. № 12. Т. 2. С. 203-205.
14. Brace L.H., Kliore A.J. The structure of the Venus ionosphere // Space Science Reviews. 1991. V. 55. Jan.-Feb. P. 81-163.
15. 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.
16. J.-C. Gérard, S.W. Bougher, M.A. López-Valverde, et al. Aeronomy of the Venus Upper Atmosphere // Space Sci. Rev. 2017. V. 212. Is. 3-4. P. 1617–1683.
17. T. Imamura, H. Ando, S. Tellmann et al. Initial performance of the radio occultation experiment in the Venus orbiter mission Akatsuki // Earth, Planets and Space. 2017. V. 69. Is. 1. P:137
18. Glaze L.S., Wilson C.F., Zasova L.V., Nakamura M., Limaye S. Future of Venus Research and Exploration, Space Sci Rev (2018) 214:89, <https://doi.org/10.1007/s11214-018-0528-z>