

Неоднородности ионосферы 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 показано, что возникновение и эволюция крупномасштабных возмущений ионосферы Венеры в области максимума ионизации может быть следствием распространения волновых процессов из атмосферы в ионосферу.

It is shown that the occurrence and evolution of large-scale perturbations of the Venusian ionosphere in the region of the maximum ionization may be due to the propagation of wave processes from the atmosphere to the ionosphere.

В радиозатменных экспериментах с борта космических аппаратов (КА) *Mariner-5*, -10, *Венера-9*, -10, -15, -16, *Pioneer-Venus*, *Magellan*, *Venus-Express*, *Akatsuki* [1-5] излучали в направлении Земли две когерентные радиоволны дециметрового и сантиметрового диапазонов длин волн. Метод радиозатмений использует связь вызываемых средой изменений частоты и мощности радиоволн с профилем показателя преломления ионосферы для определения ее параметров в диапазоне высот от нижней границы (~85 км) до ионопаузы (от ~230 км до ~1200 км). 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 в диспергирующей среде. Для решения обратной задачи радиопросвечивания и вычисления вертикального профиля концентрации электронов использовали известные интегральные соотношения. В экспериментах получена достаточно большая серия высотных профилей электронной концентрации при различных условиях освещенности Солнцем и достигнутая точность определения концентрации электронов позволила изучить характеристики неоднородностей слоистых структур ионосферы Венеры. Целью данной работы является получение новых сведений о возмущениях плазмы в ионосфере Венеры.

Распределение электронной концентрации в дневной ионосфере Венеры

Ионосфера планеты формируется ионизацией нейтральной атмосферы под действием солнечного излучения. Вариации активности Солнца изменяют скорость ионизации нейтральных составляющих, что приводит к закономерным вариациям высотного профиля электронной концентрации в ионосфере [1-5]. Кроме того, при отсутствии магнитного поля планеты поток замагниченной плазмы солнечного ветра взаимодействует с ионосферной плазмой, что приводит к формированию ионопаузы – верхней границы ионосферы. Вариации потоков солнечного излучения и солнечного ветра изменяют характеристики ионосферы, экспериментальные исследования свойств ионосферы Венеры установили основные закономерности воздействия состояния Солнца на вертикальное распределение концентрации электронов. На рис.1 представлена схема изменения профиля электронной концентрации при изменении потока ультрафиолетового солнечного излучения (панель а) и изменения давления потока солнечного ветра (панель б) [2]. Панель (а) рис. 1 демонстрирует, что увеличение солнечного излучения увеличивает концентрацию электронов в ионосфере

и вследствие этого увеличивается высота ионопаузы, где давление солнечного ветра уравнивается давлением ионосферной плазмы. На панели (b) рис. 1 видно, что увеличение давления солнечного ветра приводит к уменьшению высоты ионопаузы.

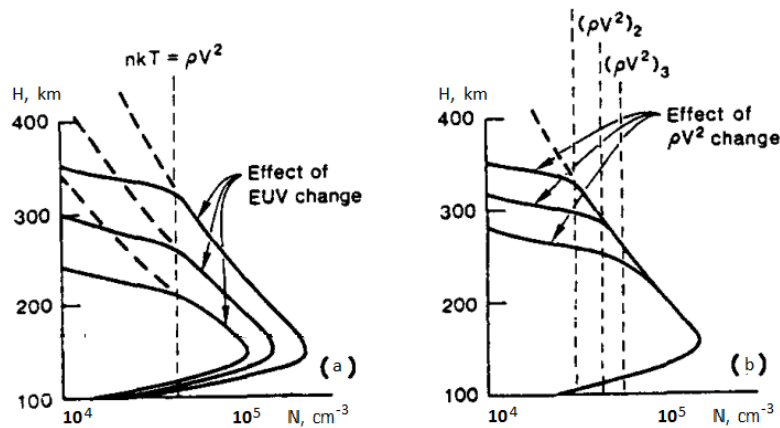


Рис. 1. Изменение профиля электронной концентрации при изменении потока солнечного излучения (панель а) и изменении давления потока солнечного ветра (панель b)

Экспериментальные данные показали, что нестационарность характеристик солнечного излучения и солнечного ветра, а также вариации параметров нейтральной атмосферы, приводят значительным пространственно-временным вариациям характеристик ионосферы. Максимальная изменчивость наблюдается в верхней ионосфере Венеры. На рис. 2 в двойном логарифмическом масштабе представлены результаты спектральной обработки двух сеансов радиопросвечивания, два спектра флуктуаций частоты f вычислены по данным сеансов радиопросвечивания 22.10.1983, высотный интервал 250...470 км (рис. 2а) и 25.10.1983, интервал 300...400 км (рис. 2б). Спектральная плотность $G_f(\nu)$ закономерно уменьшается с ростом ν и может быть аппроксимирована степенным законом $\nu^{-\alpha_f}$. На рис. 2(а,б) степенная зависимость представлена в виде прямых. Спектральный индекс спектра флуктуаций частоты α_f , на три единицы меньше показателя степени пространственного спектра турбулентности.

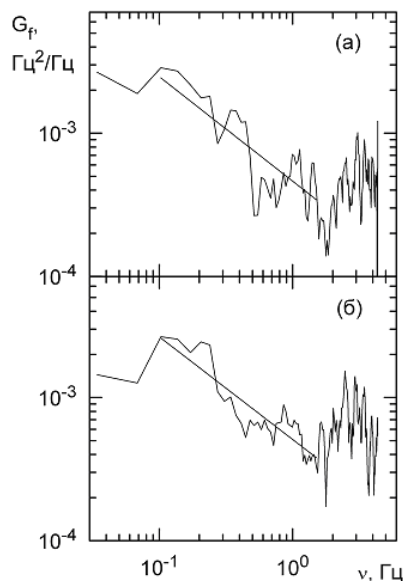


Рис. 2.
Спектры флуктуаций частоты $G_f(\nu)$.
(а) – сеанс радиовыхода 22.10.1983
(б) – сеанс радиовыхода 25.10.1983

По спектрам были найдены (на частотном интервале $0.1 < \nu < 1.0$ Гц) индексы α_f и стандартные отклонения σ_f . Величины σ_f и α_f в пределах погрешности измерений примерно идентичны для обоих сеансов и составили $\sigma_f \approx 0.023$ Гц, а $\alpha_f \approx 0.72$. Величина α_f близка к значению $\alpha_f = 0.67$, характеризующему турбулентность Колмогорова-Обухова. Характерный размер неоднородностей электронной концентрации, определяющий спектр $G_f(\nu)$ в интервале частот $0.1 \div 1$ Гц, изменяется в пределах от 6 до 60 км. Спектры показывают наличие в верхней дневной ионосфере Венеры случайных неоднородностей концентрации, среднееквадратичное значение которых составляет $\sim 10^3$ см³. Показатель степени трехмерного пространственного спектра турбулентности плазмы близок к аналогичной характеристике для спектра Колмогорова-Обухова.

На рис. 3 представлены профили $N(h)$ для малых и больших зенитных углов Солнца. Совпадение $N(h)$ на рис. 3 подтверждает закономерности временных и пространственных вариаций электронной концентрации, выявленные ранее [1-6]. Различие $N(h)$ на рис. 3 демонстрирует возмущения плазмы на разных высотах в ионосфере Венеры. Ионопауза наблюдалась в разные дни на уровне от 230 км до 1200 км, от сеанса к сеансу вариации высоты ионопаузы достигали сотен км и концентрация в верхней ионосфере обычно сильно различается. Главный максимум ионизации обычно располагается на высоте ~ 142 км. Нижний максимум в виде перегиба находится на ~ 14 км ниже. Ниже 130 км на всех профилях концентрация быстро уменьшается, поэтому предполагалось, что ниже ~ 120 км ионосферной плазмы нет, а флуктуации в нижней части характеризуют лишь методические и случайные погрешности. Различие $N(h)$ на рис. 3 свидетельствует о значительной изменчивости ионосферы, обусловленной вариациями параметров ионизирующего излучения Солнца и солнечного ветра. Обнаруженные закономерности изменения $N(h)$ объясняются существующей теорией формирования ионосферы [7].

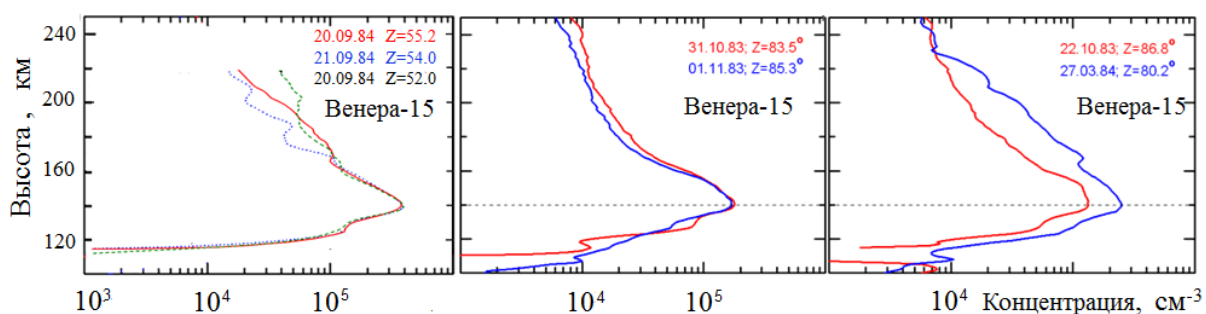


Рис. 3. Вертикальные профили электронной концентрации $N(h)$, полученные по радиозатменным данным при разных условиях формирования дневной ионосферы.

Апробированные модели формирования венерианской ионосферы (аналогичные модели земной ионосферы) указали на физико-химические процессы в обнаруженных слоях, и было показано, что процессы формирования дневной ионосферы Венеры и Земли похожи. Разделение земной ионосферы на слои D, E, F1, F2 обусловлено преобладающими физико-химическими процессами в этих слоях. Чтобы сохранить традиционный физический смысл разделения ионосферы на слои мы предлагаем обозначить слои на Венере следующим образом: vD , vE , $vF1$, $vF2$ – в соответствии с преобладающими физико-химическими процессами (как в земной ионосфере). 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 электронной концентрации $N(h)$ 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 vE и $vF1$ формируются в условиях фотохимического равновесия.

Влияние диффузии плазмы выше ~ 180 км обычно приводит к изменению шкалы высот профилей $N(h)$, однако данные КА *Венера-9,-10* показали возможность существования еще одного максимума $N(h)$ на высоте ~ 200 км. Моделирование указало, что этот слой $vF2$, может быть аналогом слоя F2 земной ионосферы. Небольшой по величине локальный максимум $N(h)$ на высоте ~ 200 км наблюдали и в миссии *Pioneer-Venus*, но предположили, что его существование обусловлено образованием магнитных жгутов в ионосфере. Детальное моделирование и более

точные экспериментальные сведения в будущем помогут лучше понять, какая из гипотез более достоверная.

Было показано, что при слабо возмущенной плазме на трассе связи относительная погрешность определения концентрации электронов в слоях $\nu F2$ и $\nu F1$ может составлять 1%-2%, в слое νE она возрастает до 4%-6%, а в слое νD , на возможность существования которого указывают локальные максимумы $N(h)$ ниже 130 км на рис. 3, погрешность может быть более 100% при использовании традиционной методики определения $N(h)$. При сильно возмущенной плазме на трассе связи или при одночастотном радиопросвечивании погрешность определения электронной концентрации может возрасти в несколько раз. Асимметрия венерианской ионосферы может внести дополнительные погрешности в определение электронной концентрации, сравнимые с влиянием крупномасштабных возмущений межпланетной плазмы.

Установлено, что в области νD наблюдается максимальное влияние факторов, ухудшающих достоверность сведений об электронной концентрации в ионосфере, именно по этой причине отсутствовали надежные сведения о существовании области νD до тех пор, пока не был разработан новый метод анализа радиозатменных данных [8]. Новый метод анализа данных на основе обнаруженного инварианта радиозатменного эксперимента открыл возможность получения достоверных сведений о нижней области ионосферы. Применение этого метода выявило ионизованную область νD в диапазоне высот 85...130 км, которая, по-видимому, является аналогом области D земной ионосферы [8]. Применение метода позволило обнаружить вблизи нижней границы дневной ионосферы Венеры периодические возмущения электронной концентрации, уровень которых превышал случайные вариации, обусловленные шумом [3]. Колебания электронной концентрации с характерными масштабами 5-10 км по вертикали наблюдали в интервале высот от 85 до 130 км, что позволило доказать существование области νD на освещенной стороне Венеры. Эта область νD присутствовала в 19 сеансах радиозатмений для зенитных углов Солнца $56^\circ < Z < 87^\circ$. В 7 сеансах из 9 при $87^\circ < Z < 92^\circ$ нижняя ионосфера проявлялась, но эффект был сравним с помехами. В 25 сеансах при $92^\circ < Z < 160^\circ$ аналогичные слои плазмы на высотах $80 < h < 115$ км отсутствовали. Но существующие модели, в том числе и международная модель *VIRA*, не позволяют объяснить существование плазмы ниже 120 км. Выявленное уменьшение радиофизических проявлений нижней ионосферы с приближением к области терминатора и их исчезновение на ночной стороне исключает предположение о метеорной природе нижней области ионосферы, необходимо искать другие физические механизмы, ответственные за образование этой области.

Крупномасштабные возмущения ионосферы Венеры, наблюдаемые на профилях $N(h)$ рис. 3 на разных высотах предположительно являются результатом волнообразных взаимодействий между атмосферой и ионосферой Венеры. При справедливости такой гипотезы становится понятным механизм образования периодических колебаний $N(h)$ в области νD и миграции возмущений $N(h)$ по высоте в областях $\nu F2$, $\nu F1$, νE . Радиозатменные данные миссий *Pioneer-Venus*, *Magellan*, *Venus-Express*, *Akatsuki* не противоречат представленным сведениям.

Заключение

Показано, что возникновение и эволюция крупномасштабных возмущений ионосферы Венеры в области максимума ионизации может быть следствием распространения волновых процессов из атмосферы в ионосферу. Более глубокое изучение условий эволюции крупномасштабных возмущений ионосферы будет возможно в миссии *Венера-Д* [9] путем сопоставления данных различных экспериментов. Предлагаемый новый подход позволит изучить тонкую структуру

взаимодействия атмосферы и ионосферы с использованием вариаций мощности и частоты двух когерентных радиоволн. Оптимизация радиочастотной системы на основе обобщения опыта предыдущих миссий позволит применить новые подходы для получения неизвестных сведений об атмосфере и ионосфере Венеры, состоянии и динамике плазмы в солнечной системе. В результате могут быть получены новые знания о распространении возмущений из атмосферы в ионосферу, в том числе о распространении волновых возмущений, природа которых до настоящего времени не исследована.

Работа выполнена в рамках государственного задания и частично поддержана Программой 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. Brace L.H., Kliore A.J. The structure of the Venus ionosphere // Space Science Reviews. 1991. V. 55. Jan.-Feb. P. 81-163.
3. 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.
4. 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.
5. 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
6. 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.
7. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 528 с. ISBN 5-02-000716-1.
8. 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.
9. 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>