

УДК 535.37:523.42

ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИ РЕШЕНИИ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЯ ДНЕВНОЙ ИОНОСФЕРЫ ВЕНЕРЫ

А. Л. Гаврик

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова
РАН, 141120, Московская область, Фрязино, пл. академика Введенского, 1

Статья поступила в редакцию 31 августа 2018 г.

Аннотация. Выполнены анализ ошибок определения концентрации электронов в дневной ионосфере Венеры по результатам радиопросвечивания и оценка перспективы получения более точной информации о свойствах ее ионосферы по данным завершенных и планируемых миссий. Исследование основано на данных спутников Венера-9,-10,-15,-16 и моделировании эксперимента радиопросвечивания. По результатам радиозатменных экспериментов завершенных миссий в дневной ионосфере Венеры выделены области $\nu F2$, $\nu F1$, νE , νD , указывающие на слоистую, стратифицированную структуру ионосферы, обусловленную преобладающими физическими процессами, которые аналогичны процессам в слоях F2, F1, E, D земной ионосферы. Расчеты электронной концентрации основаны на интегрировании данных, искаженных широкополосным шумом. Моделирование эксперимента показало, что погрешность определения концентрации электронов в разных областях ионосферы разная. Главным источником погрешностей метода радиозатмений является межпланетная плазма на трассе радиосвязи если ее влияние на параметры радиоволны существенно превышает флуктуации амплитуды, фазы и частоты радиоволны, обусловленные ограниченной стабильностью аппаратуры и низким энергетическим потенциалом радиолинии. Установлено, что в области νD всегда будет максимальное влияние факторов, ухудшающих достоверность сведений об ионосфере. Для исследования процессов, ответственных за динамические изменения в системе атмосфера-ионосфера, в планируемой миссии Венера-Д необходимо увеличить энергетический

потенциал радиолинии. Как следствие, усовершенствованные методы анализа результатов радиозатмений позволят получить новые сведения о Венере с хорошей точностью.

Ключевые слова: распространение радиоволн, радиопросвечивание ионосфер, флуктуации частоты и мощности радиоволн.

Abstract. The analysis of errors in the determination of electron density in the daytime ionosphere of Venus based on the results of radio occultation and an assessment of the prospects for obtaining more accurate information about the properties of its ionosphere from the data of completed and planned missions are presented. The study was performed on the basis of the data of the Venus-9,-10,-15,-16 satellites and the simulation of the occultation experiment. According to the radio occultation experiments of completed missions, the $\nu F2$, $\nu F1$, νE , νD regions are identified in the daytime ionosphere of Venus, indicating the stratified structure of the ionosphere due to prevailing physical processes that are analogous to the processes in the terrestrial ionosphere layers F2, F1, E, D. Electron density calculations are based on the integration of data distorted by broadband noise. The simulation of the experiment showed that the error in determining the electron density in different regions of the ionosphere is different. The main source of error in the method of radio occultation is interplanetary plasma on the radio communication path if its influence on the parameters of the radio wave significantly exceeds the fluctuations in the amplitude, phase and frequency of the radio wave caused by the limited stability of the equipment and the low energy potential of the radio link. It is established that in the region of νD there will always be a maximum effect of factors that impair the reliability of the information on the ionosphere. To study the processes responsible for dynamic changes in the atmosphere-ionosphere system, it is necessary to increase the energy potential of the radio link in the planned mission of Venera-D. As a result, improved methods of data analysis will allow obtaining new information about Venus with good accuracy.

Keywords: radio wave propagation, occultation of ionosphere, fluctuations in frequency and power of radio waves.

1. Введение

Задача радиозатменного эксперимента с использованием спутника планеты – двухчастотное радиопросвечивание ее ионосферы и атмосферы с целью изучения закономерностей поведения газовой оболочки при разных условиях освещенности Солнцем. Возможность получения долговременных однородных измерений параметров атмосферы и ионосферы на высотах, которые малодоступны для исследования другими методами, указывает на актуальность и высокую информативность радиозатменных исследований [1].

В научную программу миссии Венера-Д [2] включен радиофизический эксперимент, в котором для изучения газовой оболочки запланирован анализ параметров радиоволн на линии связи между космическим аппаратом (КА) и Землей. Основным оборудованием для проведения эксперимента служит бортовая система радиосвязи и наземная система слежения, управления и связи с КА в дальнем космосе. В миссии Венера-Д наш интерес сосредоточен на изучении возмущений ионосферы и атмосферы, которые изменяют структуру газовой оболочки Венеры. Взаимодействие между верхней атмосферой и нижней ионосферой Венеры, а также волновые процессы, как в атмосфере, так и в ионосфере, наименее изучены и будут наиболее привлекательной областью наших исследований при анализе данных радиопросвечивания и сопоставлении полученных сведений с данными других экспериментов.

Задача подготовки радиофизических исследований состоит в том, чтобы оптимизировать систему связи и усовершенствовать методы наблюдений по сравнению с предыдущими миссиями, в результате чего возрастет точность и информативность экспериментальных данных. Цель данной работы – анализ погрешностей определения электронной концентрации в ионосфере Венеры по радиоданным и оценка перспективы получения более точной информации о свойствах ионосферы Венеры по данным завершенных и планируемых миссий.

2. 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 измерений мощности, фазы и частоты принимаемых радиоволн, и, следовательно, 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].

Главным источником погрешностей метода радиозатмений могут быть вариации концентрации межпланетной плазмы и земной ионосферы на трассе распространения радиоволн между КА и наземным пунктом радиосвязи [3,4]. 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 возрасти на порядок и более при неблагоприятных условиях проведения эксперимента, когда возмущения плазмы на трассе радиосвязи существенные [5].

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 снижают качество сведений об ионосфере, в частности, вблизи нижней границы дневной ионосферы Венеры [4,6], что ограничит возможность обнаружения и исследования процессов, ответственных за динамические изменения в системе *атмосфера-ионосфера*.

3. Флуктуации параметров радиоволн вдали от исследуемой ионосферы

Применение метода дисперсионного интерферометра при двухчастотном радиопросвечивании и использование разностной частоты для нахождения

характеристик ионосферы позволяет исключить эффекты, не связанные с дисперсией среды на пути распространения радиоволн, а именно: неточный учёт движения КА, плавную нестабильность бортового и наземного задающего генератора, влияние нейтральной атмосферы [1,3,4]. Однако присутствуют другие источники флуктуаций: во-первых, шум излучателей и приемников, во-вторых, вариации электронной концентрации на трассе радиосвязи в межпланетном пространстве и ионосфере Земли. Случайные флуктуации параметров радиоволн, обусловленные этими факторами, невозможно прогнозировать и отделить друг от друга, но можно полагать, что величина аппаратного шума сравнима с минимальными флуктуациями результатов измерений параметров радиоволн, зарегистрированных в серии экспериментов.

Следует отметить, что влияние плазмы на изменение частоты радиоволны $f(t)$ в ионизированной среде пропорционально длине зондирующей радиоволны, а величина шума аппаратуры, обусловленного нестабильностью задающего генератора, обратно пропорциональна длине радиоволны. Поэтому, при исследовании плазменных неоднородностей, влияние которых незначительно превышает шум, целесообразно использовать длинноволновый диапазон радиоволн, т.к. в этом случае порог обнаружения плазменных неоднородностей на фоне аппаратного шума зависит от второй степени длины радиоволны.

В миссиях Венера-9,10,11,12,13,14,15,16 излучали когерентные сигналы с длинами волн $\lambda \approx 32$ и 8 см с целью исследования газовой оболочки Венеры и межпланетной плазмы. Решение аналогичных научных задач в США, странах ЕЭС и Японии обеспечивали когерентной комбинацией сигналов S ($\lambda=13.1$ см) и X ($\lambda=3.6$ см) диапазонов. Различие в длинах волн L ($\lambda \approx 32$ см) и S диапазонов предоставило отечественным экспериментам преимущества при изучении плазмы. При одинаковой стабильности аппаратуры и высоком потенциале радиолинии погрешность обнаружения плазменных неоднородностей по вариациям мощности и частоты радиоволн на фоне аппаратного шума для сигнала L диапазона была в 6 раз меньше, чем для сигнала S диапазона [3].

Именно частота сигнала $f(t)$ связана с углом рефракции радиоволны в

ионосфере, он, в свою очередь, связан интегральным соотношением с высотным профилем электронной концентрации [1,7,8], а случайные флуктуации $f(t)$ ограничивают точность определения концентрации. На рис. 1 показана зависимость максимальной скорости изменения интегральной концентрации электронов ΔN_T на трассе радиосвязи (которая прямо пропорциональна флуктуациям частоты σ_f зондирующей радиоволны $\lambda \approx 32$ см) от расстояния между радиотрассой и Солнцем R . Усредненную эмпирическую зависимость, описывающую изменение ΔN_T [5,9] в диапазоне прицельных параметров $4R_0 < R < 215R_0$ (R_0 – радиус Солнца) при длине трассы радиосвязи ~ 100 млн. км можно представить в виде:

$$\Delta N_T(R) = 1.3 \cdot 10^{19} (R/R_0)^{-10} + 8 \cdot 10^{13} (R/R_0)^{-2} + 2.5 \cdot 10^{12} (R/R_0)^{-1}. \quad (1)$$

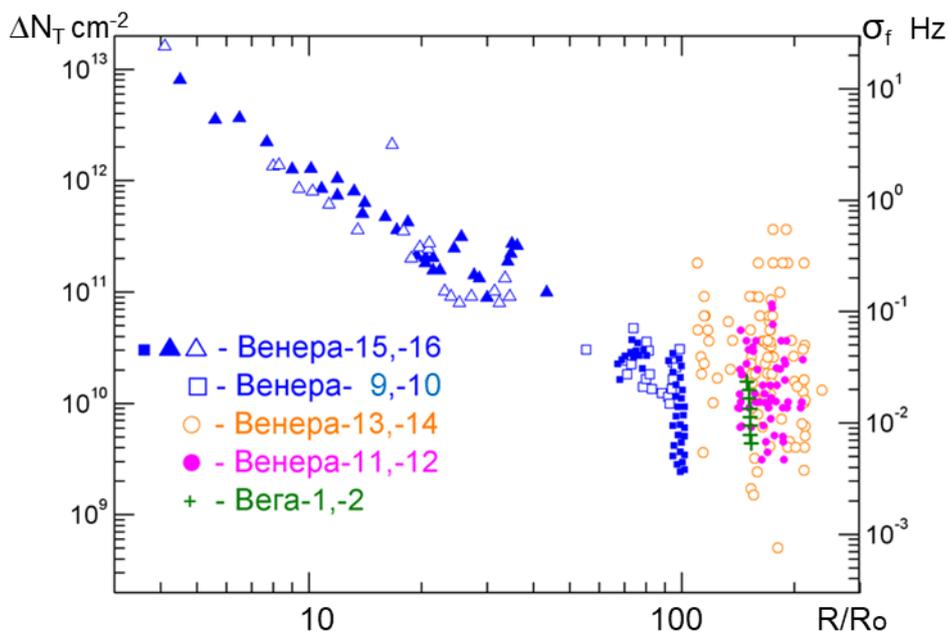


Рис. 1. Среднеквадратичное значение σ_f флуктуаций $f(t)$, которые пропорциональны скорости изменения интегральной концентрации электронов ΔN_T при радиозондировании солнечного ветра.

Из представленных на рис. 1 данных следует, что аппаратный шум не превышал 0.003 Гц, т.е. флуктуации $f(t)$ выше этого уровня обусловлены плазмой на трассе радиосвязи. В сеансах зондирования ионосферы Венеры величина мешающих флуктуаций $f(t)$ может возрасти на порядок при наличии возмущений в межпланетной плазме или в ионосфере Земли. Величина σ_f

возрастает и при увеличении длины трассы радиосвязи, и при уменьшении прицельного параметра R [5,9]. Увеличение мешающих флуктуаций $f(t)$ выше уровня 0.1 Гц при заходе Венеры за Солнце ($R < 50R_0$) существенно уменьшит точность определения электронной концентрации в ионосфере Венеры.

На рис. 2 показаны значения флуктуаций $f(t)$ на контрольных участках измерений длительностью 5...10 минут, свободных от влияния плазмы Венеры, которые характеризуют шум в процессе зондирования ионосферы Венеры в миссии Венера-15,-16 [4,5]. На рис. 2 видно, что в первом цикле измерений при длине трассы радиосвязи ~ 100 млн. км величина σ_f как правило не превышает 0.02 Гц и точность определения характеристик ионосферы из данных просвечивания в этот период времени более высокая, чем в двух других циклах измерений, в которых длина трассы радиосвязи увеличилась.

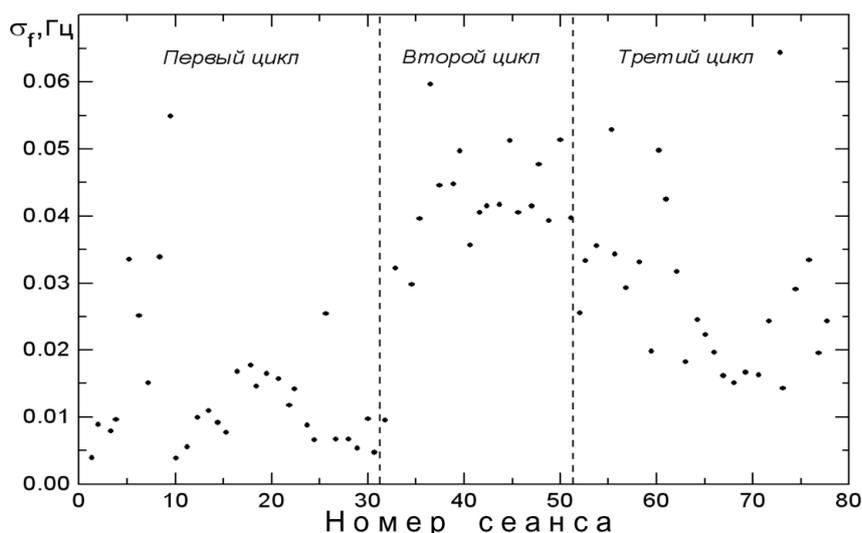


Рис. 2. Среднеквадратичные значения σ_f флуктуаций частоты $f(t)$ на контрольном участке измерений длительностью 5...10 минут в сеансах 3 циклов радиозондирования ионосферы Венеры в миссии Венера-15,-16.

Следует отметить, что во всех миссиях к Венере проводили эксперименты по радиозондированию солнечного ветра, на основе которых изучали флуктуации потока энергии радиоволн. Экспериментальные данные указывают на то, что крупномасштабные неоднородности плазмы и атмосфера Земли практически не влияют на вариации мощности радиоволны $\lambda \approx 32$ см. Флуктуации мощности сигналов при $R > 50R_0$ обусловлены движением

неоднородностей плазмы с широкими пределами изменений масштабов неоднородностей. Величина флуктуаций мощности сигналов нарастает при увеличении длины трассы радиосвязи и при ее приближении к Солнцу, но в экспериментах радиопросвечивания газовой оболочки Венеры при $R > 50R_0$ достаточно слабые флуктуации мощности сигналов почти не маскируют эффекты, обусловленные ионосферой и атмосферой Венеры [4]. Неблагоприятными могут стать условия радиопросвечивания, если радиотрасса приблизится к Солнцу, т.к. при $R < 50R_0$ флуктуации мощности сигналов быстро растут, при $R < 20R_0$ флуктуации могут стать насыщенными и не позволят выделить эффекты радиопросвечивания ионосферных неоднородностей [1].

4. Структура ионосферы Венеры по данным радиопросвечивания

Для получения высотного профиля показателя преломления зондируемой оболочки планеты используют данные об изменении частоты радиоволн, т.к. использование вариаций мощности сигнала с этой целью существенно увеличивает погрешности профиля. Вариации $f(t)$, обусловленные ионосферой, зависят от вертикального распределения электронной концентрации $N(h)$ [1,8]:

$$f(p) = - \frac{p \lambda V e^2}{\pi m c^2} \int_p^{h_i} \frac{dN(r)}{dr} \frac{dr}{\sqrt{r^2 - p^2}}, \quad (2)$$

где p – прицельный параметр радиолуча, V – скорость погружения линии КА-Земля в газовую оболочку, h_i – верхняя граница ионосферы, e , m – заряд и масса электрона, c – скорость света. На основе соотношения (2) можно решить обратную задачу радиопросвечивания и определить $N(h)$ по экспериментальным данным [1,7,8,10]:

$$N(p) = - \frac{2 m c^2}{\lambda V e^2} \int_p^{h_i} \frac{f(r) dr}{\sqrt{r^2 - p^2}}. \quad (3)$$

Использование этой методики [8,11] позволило экспериментально выявить основные свойства дневной и ночной ионосферы Венеры, а апробированная модель формирования ионосферы [12,13] (аналогичная модели земной ионосферы) указала на преобладающие физико-химические процессы в разных

областях. Разделение ионосферы на высотные 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. Физический смысл такого разделения ионосферы на слои обусловлен преобладающими физико-химическими процессами в этих слоях.

Данные КА Mariner-5 и Mariner-10 [8] показали, что главный максимум ионизации дневной ионосферы на высоте ~ 142 км обусловлен [12,13] 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. Но в области доминирования процессов диффузии максимум $N(h)$ в данных КА Mariner-5,-10 отсутствовал. Серия профилей $N(h)$, полученная по данным радиозатмений КА Венера-9,-10, позволила установить возможность существования еще одного максимума $N(h)$ выше 180 км, аналога слоя F2 земной ионосферы [14], который достаточно редко образуется в виде небольшого по величине локального максимума $N(h)$, а в большинстве сеансов влияние диффузии плазмы приводит к изменению шкалы высот профиля $N(h)$ выше 180 км. Данные КА Венера-15,-16, позволили выявить еще одну ионизованную область [15] в диапазоне высот 85-115 км, которая, по видимому, является аналогом области D земной ионосферы. Радиозатменные данные миссий Pioneer-Venus [16], Magellan [17], Venus-Express [18], Akatsuki [19] не противоречат этим сведениям. Однако, из-за некорректной оценки погрешности метода радиопросвечивания в области нижней границы ионосферы в миссии Venus-Express [20], появилась гипотеза о существовании метеорного слоя ниже 115 км на Венере [21], которая противоречит данным КА Венера-15,16 [4,15].

Чтобы сохранить традиционный физический смысл разделения ионосферы

на слои с преобладающими физико-химическими процессами мы обозначим слои на Венере следующим образом: $\nu F2$, $\nu F1$, νE , νD . Отметим, что погрешность определения $N(h)$ в этих областях разная, что обусловлено методикой расчета $N(h)$, основанной на интегрировании данных, искаженных широкополосным шумом.

5. Погрешности определения электронной концентрации при решении обратной задачи радиопросвечивания ионосферы Венеры

Проверку методики расчётов и анализ возникающих погрешностей $N(h)$ осуществляли следующим образом. Для сферически симметричной ионосферы с заданным высотным профилем электронной концентрации $N^{(1)}(h)$ решали прямую задачу просвечивания (формула 2) и определяли изменение частоты радиоволны $f^{(1)}(h)$. Далее по зависимости $f^{(1)}(h)$ решали обратную задачу радиопросвечивания (формула 3) и находили высотный профиль $N^{(2)}(h)$.

На рис. 3 представлены разности $\delta N(h) = N^{(2)}(h) - N^{(1)}(h)$ (панель б), характеризующие абсолютную погрешность вычисления $N(h)$, и относительная погрешность определения $N(h)$ -профиля: $(N^{(2)}(h) - N^{(1)}(h)) / N^{(1)}(h)$ (панель в), полученные для профиля $N^{(1)}(h)$ (рис. 3, панель а). Шаг дискретизации данных по высоте Δh составлял либо 1 км, либо 2 км (рис. 3 б, в). На рис. 3 видно, что погрешности определения $N(h)$ увеличиваются с ростом шага дискретизации Δh . В экспериментах с КА Венера-9,-10,-15,-16 шаг Δh не превышал 1.5 км. На рис. 3 видно, что относительная ошибка нахождения $N(h)$ в области $\nu F2$ ($h > 180$ км) меньше 1%. В области $\nu F1$ ($140 < h < 180$ км) погрешности, как видно на рис. 3, могут достигать ~2%, а в области νE ($h \approx 130$ км) погрешность увеличивается до 6%. Быстрое увеличение погрешности $N(h)$ на высотах $h < 130$ км обусловлено применяемой методикой расчетов, которая предполагает непрерывность и гладкость функций, т.к. чувствительна к нестационарностям в экспериментальных данных. Ошибки интегрирования $f(h)$ при наличии шума и горизонтальные градиенты электронной концентрации в ионосфере приводят к резкому увеличению систематической погрешности вблизи нижней границы ионосферы при решении обратной задачи.

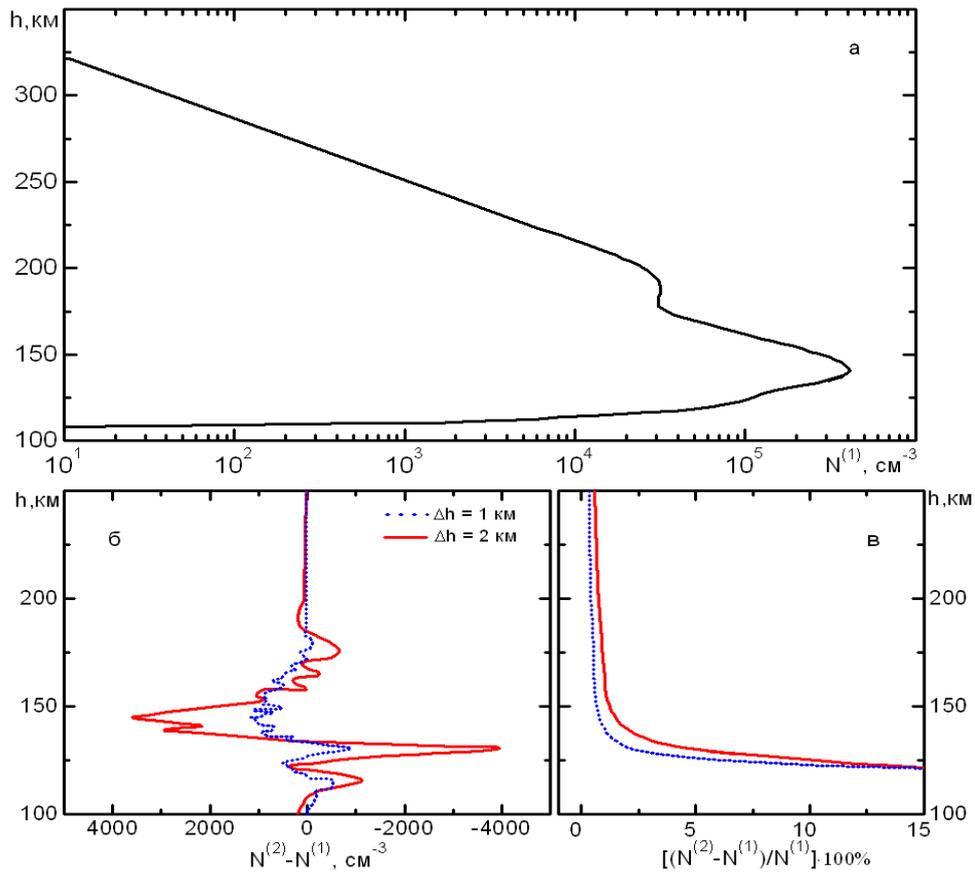


Рис. 3. Разности $N^{(2)}(h) - N^{(1)}(h)$ (панель б), $(N^{(2)}(h) - N^{(1)}(h)) / N^{(1)}(h)$ относительная погрешность (панель в) при моделировании с профилем $N^{(1)}(h)$ (панель а).

При численном интегрировании соотношения (3), связывающего искомый профиль $N(h)$ с изменением частоты $f(h)$, сначала из экспериментальной функции $f(t)$, зависящей только от влияния плазмы, необходимо вычесть линейный тренд, обусловленный вариациями неоднородностей плазмы на трассе связи с широкими пределами изменений масштабов неоднородностей. Этот тренд определяют на контрольном участке измерений длительностью 5-15 мин. за пределами зондируемой ионосферы. После вычитания тренда флуктуации $f(t)$ характеризуют случайный шум. В качестве примера на рис. 4 показаны результаты расчетов $N(h)$ в верхней ионосфере, а также на контрольном участке, где флуктуации характеризуют погрешности $N(h)$, обусловленные вариациями интегральной электронной концентрации на трассе связи, для 4 сеансов (14.10; 16.10; 17.10 и 19.10.1983 г.) радиопросвечивания с борта КА Венера-15. Стрелками на рис. 4 указана высота верхней границы

ионосферы. При не возмущенной космической плазме 14.10 и 19.10.1983 г. (рис. 4, кривые 1, 4) величина ошибки определения электронной концентрации не превышала значение 10^3 см^{-3} , а среднеквадратичная погрешность была меньше $3 \cdot 10^2 \text{ см}^{-3}$. При возмущенной плазме 16.10 и 17.10.1983 г. (кривые 2, 3) величина ошибки возросла до $\sim 5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$, а среднеквадратичная погрешность составила $2 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$.

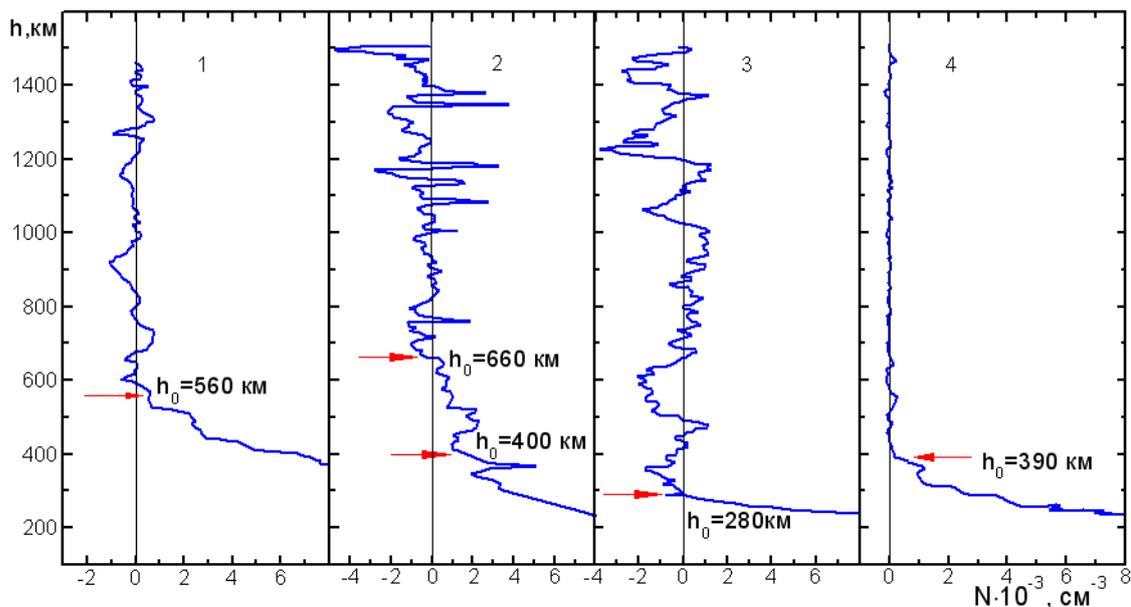


Рис. 4. Распределения электронной концентрации $N(h)$ в верхней ионосфере и прогноз ошибки её определения из-за влияния плазмы на трассе радиосвязи, стрелками указана высота ионопаузы.

Оценки погрешности определения $N(h)$, обусловленные мелкомасштабными неоднородностями, сделанные на основе флуктуаций $N(h)$, показанных на рис. 4 выше ионопаузы, могут быть справедливы только при слабо возмущенной плазме на трассе связи и только в области $\nu F2$, длительность просвечивания которой составляет 1-2 мин и можно полагать, что прогноз тренда частоты достаточно точный. Однако многочисленные радиопросвечивания межпланетного пространства показывают, что сеансов с благоприятными условиями эксперимента будет не более 20%. А в случае одночастотных радиопросвечиваний, в которых необходимо устранять доплеровское смещение частоты из-за взаимного перемещения КА и Земли, появятся дополнительные погрешности, обусловленные неточным прогнозом траектории КА.

Рассмотрим вопрос о погрешностях $N(h)$, обусловленных крупномасштабными вариациями интегральной электронной концентрации на трассе связи $N_T(t)$. Частичный учёт влияния таких неоднородностей на результаты радиопросвечивания ионосферы Венеры проводили экстраполяцией среднего хода $N_T(t)$ на ионосферный участок измерений, полагая, что тренд $N_T(t)$ во время зондирования ионосферы такой же, как и на контрольном участке. Однако, во многих сеансах зарегистрированы заметные вариации тренда $N_T(t)$, что может привести к неправильному учёту влияния космической плазмы на результаты просвечивания. Погрешности такого рода тем больше, чем длиннее интервал экстраполяции тренда $N_T(t)$. Поэтому погрешности определения $N(h)$ в областях $\nu F1$, νE , отстоящих от начала просвечивания ионосферы по времени на 1...5 минут, могут существенно превышать оценки флуктуаций, представленные на рис. 4, которые справедливы в области $\nu F2$.

В экспериментах с КА Венера-9,-10-15,-16 мы определяли максимальное изменение $N_T(t)$ на контрольном участке за время просвечивания ионосферы и полагали, что аналогичное изменение могло произойти в процессе просвечивания ионосферы. В качестве оценки относительной погрешности $N(h)$ в областях $\nu F1$, νE мы использовали отношение максимального изменения $N_T(t)$ на контрольном участке к максимальному изменению $N_T(t)$ в ионосфере. Расчеты показали, что величина относительной погрешности $N(h)$ в областях $\nu F1$, νE на порядок превосходит флуктуационную погрешность $N(h)$ в области $\nu F2$ и, возможно, несколько завышает ошибку определения $N(h)$, но более точный учёт влияния крупномасштабных неоднородностей космической плазмы сделать трудно. Тем не менее, относительная ошибка $N(h)$ обычно не превышает 10%, что даёт возможность с удовлетворительной точностью исследовать временные и пространственные вариации концентрации электронов в областях $\nu F1$, νE дневной ионосферы Венеры.

Влияние несферичности ионосферы на точность определения $N(h)$ может возникать, прежде всего, из-за того, что при решении обратной задачи не учитывается тот факт, что электронная концентрация зависит не только от

текущей высоты, но и от угловых координат, а именно от локального зенитного угла Солнца Z_0 , который изменяется вдоль радиолуча. На основе заданной асимметричной модели дневной ионосферы Венеры, для конкретной орбиты спутника можно вычислить при всех прицельных параметрах интегральную электронную концентрацию с учётом изменения Z_0 вдоль радиолуча. Далее по этой зависимости найти изменение частоты зондирующего сигнала, а затем решить обратную задачу радиопросвечивания в приближении сферической симметрии и получить профиль $N^{(1)}(h)$. Разность $\delta N(h) = N^{(1)}(h) - N(h)$ позволяет оценить абсолютную погрешность определения электронной концентрации, обусловленную влиянием несферичности.

Для иллюстрации на рис. 5 представлены функции $\delta N(h)$ при $\varepsilon = 90^\circ - Z_0$ (угол между направлениями на Землю и Солнце от КА) для $Z_0 = 0^\circ, 45^\circ, 70^\circ, 75^\circ$ (кривые 1-4), а также для $Z_0 = 75^\circ$ при $\varepsilon = 70, 80^\circ$ (кривые 5-6). Как видно из сопоставления кривых 1,2 абсолютная ошибка $|\delta N|$ в областях $\nu F2, \nu F1, \nu E$ при $Z_0 < 45^\circ$ незначительная, а в области νD не превысила 500 см^{-2} . При $Z_0 > 45^\circ$ (кривые 3,4) относительная погрешность $N(h)$ из-за асимметрии ионосферы может достигать 4%, т.к. с увеличением Z_0 нарастают скорость увеличения высоты ионопаузы и скорость уменьшения концентрации в области $\nu F1$, т.е. асимметрия более четко выражена. Степень асимметрии зондируемой области ионосферы зависит от взаимного расположения Солнца, Венеры, Земли и КА. Кривые 4-6 демонстрируют, что погрешность $N(h)$ разная при зондировании области с одинаковым значением Z_0 , но при разном направлении радиолуча (наиболее существенный параметр геометрии просвечивания – угол ε между направлениями на Землю и Солнце от КА). Более подробно результаты аналогичного моделирования изложены в работе [6]. Результаты моделирования свидетельствуют о том, что погрешность определения электронной концентрации, обусловленная влиянием асимметрии, сравнительно невелика, в областях $\nu F1, \nu E$ она соизмерима с погрешностями из-за межпланетной плазмы. Сравнительно малые значения погрешности из-за асимметрии можно объяснить тем, что основной вклад в величину $f(t)$ вносит

ограниченная область точки максимального приближения радиолуча к поверхности Венеры.

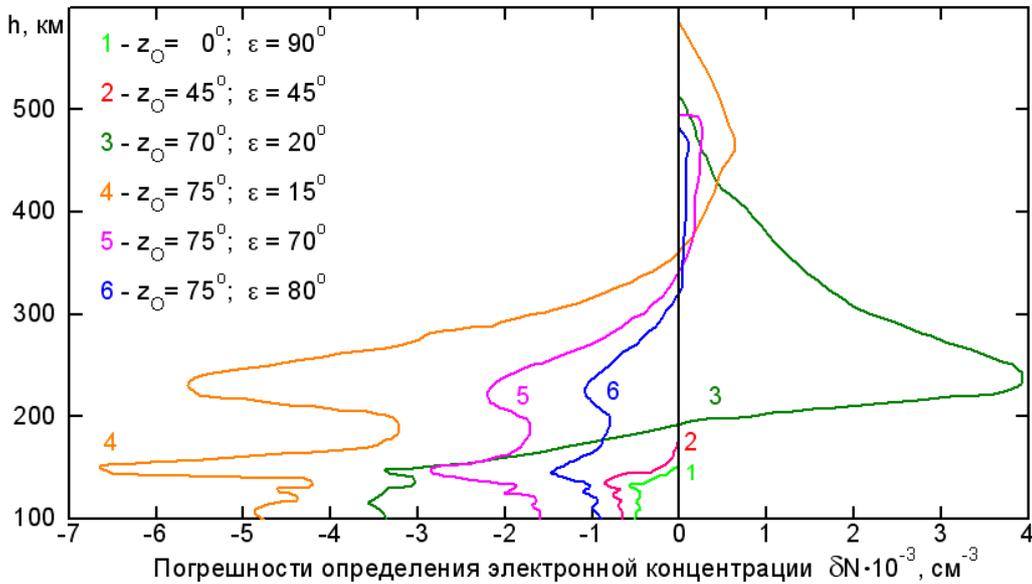


Рис. 5. Погрешности определения $N(h)$ из-за асимметрии ионосферы.

Максимальные трудности возникают при исследовании области vD дневной ионосферы Венеры, т.к. в этой области рассмотренные погрешности $N(h)$ могут быть сравнимы с величиной $N(h)$. Традиционная методика определения $N(h)$ не позволяет получить достоверный профиль концентрации электронов ниже 110 км. Небольшие вариации прогнозируемого тренда $N_T(t)$ приводят к тому, что при решении обратной задачи радиопросвечивания электронная концентрация либо исчезает на уровне 115-110 км, либо существует до очень низкой высоты, где ее не может быть. Исследовать эту нижнюю ионизованную область удалось только с помощью нового метода обнаружения плазменных неоднородностей.

Эффект, лежащий в основе нашего исследования области vD, может быть выявлен в сферически слоистой среде в отсутствие дифракции и поглощения электромагнитных волн, если слои достаточно плотные и уровень аппаратного шума низкий. Вот почему данные миссий Венера-15,-16, в которых передатчик излучал сигнал высокой мощности в диапазоне 32 см, т.е. на более низкой частоте, чем в других миссиях, были необходимы для доказательства концепции новой технологии обработки данных. Наиболее

интригующий результат, полученный с помощью этих данных, заключается в том, что стало возможным исследование ионосферы Венеры на чрезвычайно малых высотах около 80-120 км над уровнем поверхности планеты, где концентрация электронов мала [4,15]. Идея такого метода исходит из сравнения двух функций со значениями мощности сигнала. Первая функция представляет собой экспериментально наблюдаемые изменения мощности сигнала (X) в атмосфере и ионосфере, а вторая функция «предсказывает» изменение мощности (X_0), вычисленное на основе скорости изменения частоты сигнала df/dt , используя линейную связь $X_0 = \text{const} * df/dt$. Следует подчеркнуть, что прогноз X_0 применим не только к ионосфере, но и к атмосфере. Двухчастотная методика выделила изменение частоты сигнала, обусловленное только рефракцией в ионизованной среде, поэтому совпадение между $X(h)$ и $X_0(h)$ указало на существование плазменных слоев в ионосфере.

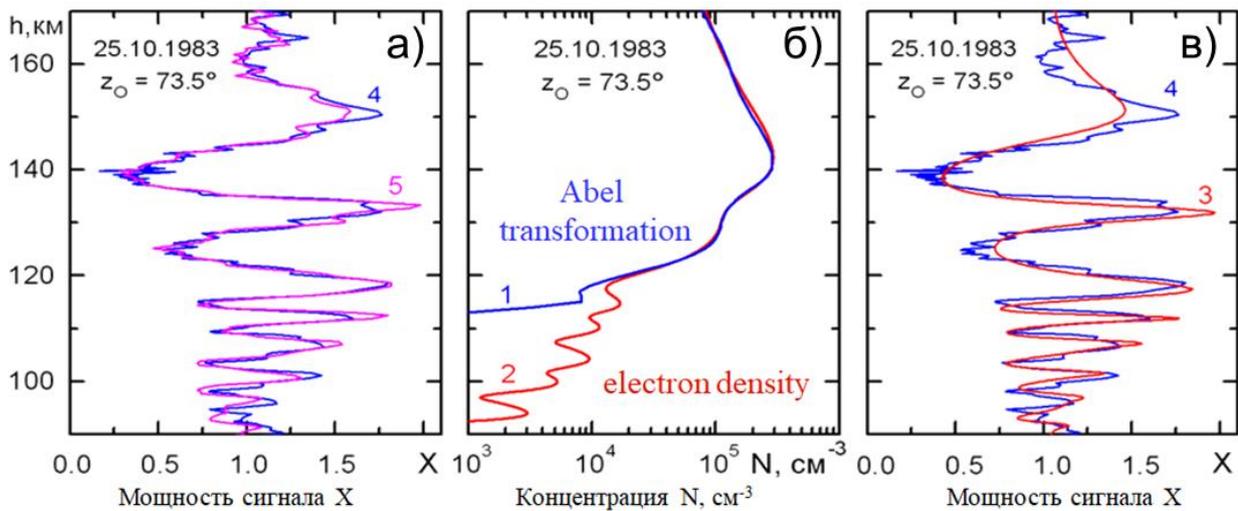


Рис. 6. Кривая 1 – профиль $N(h)$ по экспериментальным данным $f(t)$. Кривая 2 – профиль $N^*(h)$ соответствует данным $X^*(h)$ (кривая 3). Кривая 3 – результаты расчетов $X^*(h)$ в лучевом приближении для профиля $N^*(h)$. Кривая 4 - функция $X_0(h)$, вычисленная из частоты сигнала. Кривая 5 – экспериментальная функция $X(h)$ рефракционного изменения мощности.

На рис. 6а представлено сравнение между функциями $X(h)$ и $X_0(h)$, демонстрирующее совпадение вариаций $X(h)$ и $X_0(h)$, в диапазоне высот от 170 км до 90 км, что свидетельствует о влиянии плазменных структур на частоту и мощность радиосигнала во всем диапазоне высот. На рис. 6б представлен

профиль $N(h)$, полученный из соотношения (3), на котором отсутствует ионизация ниже 115 км (кривая 1), что противоречит экспериментальным данным о вариациях $X(h)$ и $X_0(h)$. Для того, чтобы получить профиль $N^*(h)$ ниже 115 км (кривая 2) мы задали слоистую структуру, параметры которой подбирали так, чтобы в результате решения прямой задачи радиопросвечивания (на основе соотношения (2) для частоты и аналогичного соотношения для мощности) получить соответствие между вычисленной $X^*(h)$ (кривая 3) и экспериментальной функцией $X_0(h)$ (кривая 4).

На рис. 6в можно видеть удовлетворительное соответствие между $X^*(h)$ и $X_0(h)$, в диапазоне высот от 90 до 170 км, что свидетельствует о достоверности распределения электронной концентрации $N^*(h)$ ниже 120 км и подтверждает возможность существования области νD на Венере. Однако оценить погрешность полученного профиля $N^*(h)$ ниже 115 км пока невозможно. Более глубокое исследование природы возмущений в области νD будет возможно в миссии Венера-Д путем сравнения данных различных экспериментов.

6. Заключение

Данные радиопросвечивания ионосферы Венеры указали, что процессы формирования дневной ионосферы Венеры и Земли похожи. Достигнутая точность определения концентрации электронов в дневной ионосфере Венеры в диапазоне высот от нижней границы (~90 км) до ионопаузы (от ~230 км до ~1200 км) позволила выделить области $\nu F2$, $\nu F1$, νE , νD венерианской ионосферы, указывающие на слоистую, стратифицированную структуру ионосферы. Смысл такого разделения ионосферы на слои $\nu F2$, $\nu F1$, νE , νD обусловлен преобладающими физико-химическими процессами, которые аналогичны процессам в слоях F2, F1, E, D земной ионосферы. Показано, что погрешность определения электронной концентрации в разных областях ионосферы разная, т.к. методика расчета электронной концентрации основана на интегрировании данных, искаженных широкополосным шумом.

Результаты многочисленных экспериментов радиопросвечивания свидетельствуют, что межпланетная плазма является главным источником

погрешностей метода радиозатмений только тогда, когда ее влияние на фазу и частоту радиоволны существенно превышает измеренные случайные флуктуации амплитуды, фазы и частоты радиоволны, обусловленные ограниченной стабильностью аппаратуры и низким энергетическим потенциалом радиолинии. Показано, что при слабо возмущенной плазме на трассе связи относительная погрешность определения концентрации электронов в слое $\nu F2$ может составлять 1%-2%, в слоях $\nu F1$ и νE она возрастает до 4%-6%, а в слое νD погрешность может быть более 100% при использовании традиционной методики определения электронной концентрации. При сильно возмущенной плазме на трассе связи или при одночастотном радиопросвечивании погрешность может возрасти в несколько раз, поэтому нежелательно проводить радиозатмения, когда радиотрасса приблизится к Солнцу ближе, чем орбита Меркурия.

Показано, что асимметрия венерианской ионосферы может внести дополнительные погрешности в определение электронной концентрации, сравнимые с влиянием не сильно возмущенной межпланетной плазмы. Поэтому необходимо выявить критерии, указывающие на необходимость учета влияния асимметрии. Установлено, что в области νD всегда будет максимальное влияние факторов, ухудшающих достоверность сведений об ионосфере, именно по этой причине отсутствовали надежные сведения о существовании области νD до тех пор, пока не был разработан новый метод анализа радиозатменных данных. Из представленного анализа погрешностей метода радиозатмений следует, что в планируемой миссии Венера-Д необходимо обеспечить высокую стабильность радиоаппаратуры и высокий энергетический потенциал радиолинии, тогда можно будет обнаружить и исследовать плазменные возмущения вблизи нижней границы ионосферы, которые могут быть связаны с динамическими изменениями в системе *атмосфера-ионосфера*.

Работа выполнена при частичной поддержке программы № 2.7П Президиума РАН.

Литература

1. Арманд Н.А., Гуляев Ю.В., Гаврик А.Л. и др. Результаты исследований солнечного ветра и ионосфер планет радиофизическими методами // Успехи физических наук. 2010. Т. 180. № 5. С. 542-548.
2. L.S. Glaze, C.F. Wilson, L.V. Zasova, M. Nakamura, S. Limaye. Future of Venus Research and Exploration // Space Sci. Rev. 2018. V. 214. Is. 4. P. 89.
3. Гаврик А.Л., Гаврик Ю.А., Копнина Т.Ф. О возможности увеличения чувствительности метода радиопросвечивания // Журнал радиоэлектроники. [электронный журнал]. 2011. № 5. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/may11/3/text.pdf>
4. 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.
5. Савич Н.А., Азарх С.Л., Вышлов А.С., Гаврик А.Л., Лаптев Н.В., Набатов А.С. Флуктуации частоты когерентных радиосигналов в околосолнечной плазме по данным аппаратов "Венера-15,16" // Космические исследования. 1987. Т. 25. № 2. С. 243-250.
6. Гаврик А.Л., Самознаев Л.Н. Анализ ошибок результатов радиопросвечивания дневной ионосферы Венеры, обусловленных ее несферичностью // Космические исследования. 1985. Т. 23. № 1. С. 148-157.
7. G. Fjeldbo, A.J. Kliore, V.R. Eshleman. The Neutral Atmosphere of Venus as Studied with the Mariner V Radio Occultation Experiments // The Astronomical journal. 1971. V. 76. N. 2. P. 123-140.
8. G. Fjeldbo, B. Seidel, D. Sweetnam, T. Novard. The Mariner 10 Radio Occultation Measurements of the Ionosphere of Venus. // Journal of the Atmospheric Sciences. 1975. V. 32. N. 2. P. 1232-1236.
9. Гаврик А.Л., Вышлов А.С., Дорошук О.Н., Конофалов В.П., Лаптев Н.В., Набатов А.С., Осмоловский И.К., Савич Н.А. Измерение вариаций интегральной электронной концентрации на трассах связи со станциями "Венера-13" и "Венера-14" // Космические исследования. 1983. Т. 21. № 3. С.

445-448.

10. Савич Н.А., Андреев В.Е., Вышлов А.С., Гаврик А.Л., Климов В.В., Конофалов В.П., Лаптев Н.В., Мармулев В.А., Местэртон А.П., Набатов А.С., Осмоловский И.К., Самознаев Л.Н., Штерн Д.Я. Полярная ионосфера Венеры вблизи терминатора планеты по радиозатменным данным спутников "Венера-15,16" // Космические исследования. 1986. Т. 24. № 3. С. 448-454.
11. A.J. Kliore, I.R. Patel, A.F. Nagy, T.E. Cravens, T.I. Gombosi. Initial Observations of the Nightside Ionosphere of Venus from Pioneer Venus Orbiter Radio Occultations // Science. 1979. V. 205, Is. 4401 P. 99-102
12. A.F. Nagy, T.E. Cravens, R.H. Chen, H.A. Taylor Jr., L.H. Brace, H.C. Brinton. Comparison of Calculated and Measured Ion Densities on the Dayside of Venus // Science. 1979. V. 205, Is. 4401 P. 107-109
13. S.J. Bauer, T.M. Donahue, R.E. Hartle, H.A. Taylor Jr. Venus Ionosphere: Photochemical and Thermal Diffusion Control of Ion Composition // Science. 1979. V. 205, Is. 4401 P. 109-112
14. 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.
15. 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.
16. Brace L.H., Kliore A.J. The structure of the Venus ionosphere // Space Science Reviews. 1991. V. 55. Jan.-Feb. P. 81-163.
17. 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.
18. J.-C. Gérard, S.W. Bougher, M.A. López-Valverde, M. Pätzold, P. Drossart, G. Piccioni. Aeronomy of the Venus Upper Atmosphere // Space Sci. Rev. 2017. V. 212. Is. 3-4. P. 1617–1683.

19. T. Imamura, H. Ando, S. Tellmann, M. Pätzold, B. Häusler, A. Yamazaki, T.M. Sato, K. Noguchi, Y. Futaana, J. Oschlisniok, S. Limaye, R.K. Choudhary, Y. Murata, H. Takeuchi, C. Hirose, T. Ichikawa, T. Toda, A. Tomiki, T. Abe, Z. Yamamoto, H. Noda, T. Iwata, S. Murakami, T. Satoh, T. Fukuhara, K. Ogohara, K. Sugiyama, H. Kashimura, S. Ohtsuki, S. Takagi, Y. Yamamoto, N. Hirata, G.L. Hashimoto, M. Yamada, M. Suzuki, N. Ishii, T. Hayashiyama, Y.J. Lee, M. Nakamura. Initial performance of the radio occultation experiment in the Venus orbiter mission Akatsuki // *Earth, Planets and Space*. 2017. V. 69. Is. 1. P:137
20. P. Withers. Prediction of uncertainties in atmospheric properties measured by radio occultation experiments // *Advances in Space Research*. 2010. V.46. P.58–73
21. M. Patzold, S. Tellmann, B. Hausler et al. A sporadic layer in the Venus lower ionosphere of meteoric origin // *Geophysical research letters*. 2010. V. 36. P. L05203.

Для цитирования:

А. Л. Гаврик. Погрешности определения электронной концентрации при решении обратной задачи радиопросвечивания дневной ионосферы Венеры. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2018. № 9. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/sep18/2/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2018.9.2