

УДК 535.37:523.42

МЕТОД ДИАГНОСТИКИ СЛОИСТЫХ СТРУКТУР В АТМОСФЕРЕ И ИОНОСФЕРЕ ПО ДАННЫМ РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЯ

А. Л. Гаврик, М. И. Бондаренко, А. А. Смыслов, Т. Ф. Копнина

Фрязинский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, 141190, г. Фрязино, Московская обл., пл. Б.А. Введенского, д.1

Статья поступила в редакцию 29 октября 2017 г.

Аннотация. Выявлена линейная зависимость между смещением частоты и изменением энергии ограниченного во времени участка монохроматической радиоволны вследствие ее рефракции при радиопросвечивании сферически-симметричной газовой оболочки планеты. Обоснован метод обнаружения стратифицированных структур в системе атмосфера-ионосфера по данным двухчастотного радиопросвечивания. Применение метода для анализа радиозатменных данных спутников ВЕНЕРА-15,-16 указало на существование нижней области дневной ионосферы Венеры и выявило в ней стратифицированные периодические вариации концентрации плазмы с вертикальным масштабом 6 км.

Ключевые слова: распространение радиоволн, радиозондирование ионосферы.

Abstract. A linear relationship between the frequency shift and the change in the energy of the time-limited region of a monochromatic radio wave is revealed due to its refraction during radio transmission of the spherically symmetric gas envelope of the planet. The method for detecting stratified structures in the atmosphere-ionosphere system based on two-frequency radio transmission data is substantiated. The application of the method for analyzing the radio occultation data of the VENERA-15, -16 satellites indicated the existence of the lower region of the Venus daytime ionosphere and revealed stratified periodic variations in the electron number density with a vertical scale of 6 km in it.

Keywords: radio wave propagation, occultation of ionosphere.

1. Введение

Несколько десятилетий радиозатменное зондирование развивают в качестве технологии диагностики газовых оболочек космических объектов: Земли [1-5], планет [6-12], комет [13,14] и Солнца [15,16]. Первое зондирование газовой оболочки планеты осуществил в 1965 г. космический аппарат (КА) MARINER-4 [6], пролетевший вблизи Марса. Радиозатменные исследования ионосферы и атмосферы Венеры начали в 1967 г. [7]. Благодаря удачным миссиям КА MARINER-5,-10, ВЕНЕРА-9,-10, PIONEER-VENUS, ВЕНЕРА-15,-16, MAGELLAN, VENUS-EXPRESS проведено более 1000 радиопросвечиваний атмосферы Венеры [9-12]. Накопленный к настоящему времени объем данных радиопросвечивания ионосферы Венеры сравнительно невелик (~900 сеансов), в то время как количество радиопросвечиваний Марсианской ионосферы превышает 6000, количество радиопросвечиваний околоземной оболочки составляет несколько тысяч в сутки и проведено несколько миллионов сеансов.

Анализ данных радиопросвечивания удобно выполнять в лучевом приближении, а для разделения радиоэффетов ионосферы и атмосферы использовать метод дисперсионного интерферометра [11]. Известные интегральные соотношения [6-8] позволяют решить обратную задачу и вычислить по изменениям частоты или мощности зондирующих сигналов радиальные профили плотности нейтральной атмосферы и концентрации электронов в ионосфере. Однако вопросы о точности метода радиозатмений при определении параметров атмосферы и ионосферы все еще актуальны [17-19]. Совершенствование методики анализа результатов радиопросвечиваний предоставит возможность извлечения новой информации о газовой оболочке из многочисленных экспериментальных данных завершенных миссий.

Преобразование экспериментальных данных в параметры атмосферы и ионосферы путем решения обратной задачи нарушает достоверность сведений о мелкомасштабных вариациях показателя преломления среды из-за использования интегральных соотношений. В частности, снижение качества сведений о показателе преломления среды наблюдается близи нижней границы

ионосферы [17-19], что ограничивает возможность обнаружения процессов, ответственных за динамические изменения в системе *атмосфера-ионосфера*.

Цель работы – показать возможность исследования стратифицированных слоев в системе *атмосфера-ионосфера* по вариациям параметров сигналов в радиозатменных экспериментах. Для разработки метода выполнен анализ характеристик поля в заданной области пространства вдоль траектории движения КА. Метод ориентирован на выявление неизвестных свойств ионосферы Венеры по данным радиозатмений КА ВЕНЕРА-15,-16, излучавших когерентные сигналы (ДМ $f_{dm}=938$ МГц и СМ $f_{cm}=q \cdot f_{dm}$, $q=f_{cm}/f_{dm}=4$) [11].

2. Радиозатменный эксперимент

Схема радиопросвечивания газовой оболочки планеты показана на рис.1. В начале эксперимента радиотрасса между источником и приемником сигналов проходит выше ионопаузы, движущийся по орбите объект *B* излучает сигналы, принимаемые объектом *A* (используемые соотношения лучевого приближения не зависят от направления излучения).

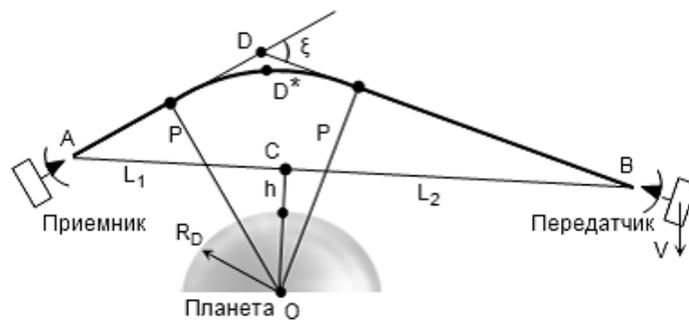


Рис.1. Схема радиозатменного эксперимента.

Предполагается, что скорость погружения линии прямой видимости *AB* в оболочку планеты $V=dh/dt$ (h – высота над поверхностью планеты), а также расстояния *CA* и *CB* от периферии линии *AB* до приемника L_1 и излучателя L_2 в процессе зондирования не изменяются (изменением этих параметров в эксперименте можно пренебречь). В сферически-симметричной среде асимптоты *AD* и *DB* искривленного радиолуча *AD*B* имеют прицельный параметр $p(t)$, величину которого вследствие малости угла рефракции $\xi(t)$

считаем равной расстоянию OD^* точки поворота луча. Такая модель допустима при зондировании околопланетной среды Венеры выше облачного слоя.

В миссии ВЕНЕРА-15,-16 передатчик КА в процессе перемещения излучает две непрерывные когерентные радиоволны, измерительная система использует лишь ограниченные интервалом времени измерения участки радиополя, попадающие в апертуру антенны. Приемник определяет среднюю на интервале времени τ мощность сигнала, ее изменение при отсутствии поглощения и рассеяния зависит от деформации лучевой трубки при рефракции. Рефракционное изменение мощности ДМ- и СМ-сигналов $X_D(t)$ и $X_C(t)$ нормируется к уровню мощности ДМ- и СМ-сигналов P_{D0} , P_{C0} на контрольном участке в отсутствии зондируемой среды:

$$X_D(t) = P_D(t) \cdot P_{D0}^{-1}, \quad X_C(t) = P_C(t) \cdot P_{C0}^{-1}$$

Регистрируемые приемником вариации мощности сигнала $X_{ap}(t) = X_a(t) + X_p(t)$ являются суммой рефракционных изменений мощности в плазме $X_p(t)$ и в нейтральной среде $X_a(t)$, вблизи нижней границы ионосферы однозначно выделить $X_p(t)$ и $X_a(t)$ из функции $X_{ap}(t)$ достаточно сложно [20].

Приемник определяет приращения за время τ фазы $\varphi(t)$ каждого сигнала и вычисляет вариации частоты $f(t) = (2\pi)^{-1} \cdot d\varphi(t)/dt$. Изменение частоты сигнала $f_{ap}(t) = f_a(t) + f_p(t)$ обусловлено изменением угла рефракции $\xi(t)$ при погружении радиолуча в оболочку планеты, содержащую нейтральные и ионизованные компоненты (слагаемые $f_a(t)$, $f_p(t)$). Для выделения эффекта плазмы вычисляем разностную частоту $\delta f(t)$ по данным о частотах ДМ- и СМ-сигналов $f_D(t)$, $f_C(t)$:

$$\delta f(t) = q^2 \cdot (q^2 - 1)^{-1} \cdot [f_D(t) - f_C(t) \cdot q^{-1}]. \quad (1)$$

При прямолинейном распространении радиоволн $\delta f(t)$ совпадает с изменением частоты ДМ-сигнала в плазме $f_p(t)$ [20]. В зондируемой ионосфере траектории сигналов разных диапазонов проходят на разных высотах, поэтому $f_p(t)$ отличается от $\delta f(t)$. Разработана методика восстановления $f_p(t)$ по вариациям $\delta f(t)$, погрешность определения $f_p(t)$ не превышала величины аппаратного шума ($10^{-2} \dots 3 \cdot 10^{-3}$ Гц при $\tau = 1$ с) [21,22].

В работе [23] показано, что при распространении волнового пакета в плавно неоднородной и медленно нестационарной среде существует адиабатический инвариант: деформация малого элемента объема волнового пакета, движущегося по траектории радиолуча, не изменяет отношение сосредоточенной в этом элементе энергии к частоте. Понятие адиабатический инвариант было выбрано по аналогии с осциллятором, для которого сохраняется отношение энергии колебаний к частоте. В радиозатменном эксперименте условия сохранения адиабатического инварианта выполнены [23], однако измерения вариаций энергии и частоты вдоль радиолуча невозможны, т.к. вариации энергии и частоты зарегистрированы в плоскости, параллельной фазовому фронту невозмущенного поля. Покажем, что при таких условиях эксперимента также существует определенная форма инварианта.

Функции $f_a(t)$, $X_a(t)$, $f_p(t)$, $X_p(t)$ связаны с показателем преломления $n(h)$ зондируемой среды и углом рефракции $\xi(t)$ известными соотношениями [6-8]. Для стратифицированной не поглощающей радиоволны среды, обладающей свойством сферической симметрии в телесном угле меньше 10° , можно получить приближенные формулы, устранив из многопараметрических соотношений (приведенных в [6-8]) слагаемые, вклад которых не превышает случайных флуктуаций. Будем использовать приближенные формулы, справедливые при $L_1 \gg L_2$ и малом параметре $\xi(t)$:

$$X_{ap}(t) = \{1 - L_2 \cdot d\xi(t)/dp\}^{-1}, \quad (2)$$

$$p(t) = R_0 + h(t) + L_2 \cdot \xi(t), \quad (3)$$

$$f_{ap}(t) = \xi(t) V \cdot L_2 \cdot \lambda^{-1}, \quad (4)$$

где R_0 – радиус планеты. Погрешность формул (2)-(4) при $\xi(t) < 10^{-3}$, $|n(h)-1| < 10^{-4}$ не превышает искажений, возникающих из-за шума. Дифференцирование формул (3), (4) и их использование для преобразования формулы (2) позволяет получить следующие соотношения:

$$dp(t)/dt = V \cdot X_{ap}(t). \quad (5)$$

$$X_{ap}(t) = 1 + [\lambda \cdot L_2 \cdot V^{-2}] \cdot df_{ap}(t)/dt. \quad (6)$$

Формула (5) устанавливает связь между вертикальной компонентой скорости КА V и скоростью погружения радиолуча в оболочку планеты $dp(t)/dt$, ранее такая связь была выявлена экспериментально [24,25], но пределы применимости эмпирической формулы в реальных экспериментах при исследовании тонких слоев оставались неясными. Полученная преобразованиями известных соотношений формула (5) доказывает правомерность ее использования при произвольных вариациях $n(h)$, не нарушающих ограничений лучевого приближения.

Соотношение (6) открывает перспективы решения новых задач диагностики системы *атмосфера-ионосфера*. Используя неэнергетические параметры сигнала $f_a(t), f_p(t)$, можно вычислить прогнозируемые рефракционные изменения $X_a(t), X_p(t)$ и сравнить их с энергетическими параметрами ДМ- и СМ-сигналов $X_D(t)$ и $X_C(t)$. Наличие корреляции параметров позволит выделить на фоне сходных по форме помех малые вариации $n(h)$ в стратифицированных слоях системы *атмосфера-ионосфера*, т.к. случайные флуктуации энергетического и неэнергетического параметров статистически независимы.

Чтобы выявить физическую сущность соотношения (6) запишем его в виде:

$$P_D(t) - P_{D0} = [P_{D0} \cdot \lambda \cdot L_2 \cdot V^{-2}] \cdot df_{ap}(t)/dt. \quad (7)$$

Измерения проведены в процессе движения КА по орбите, поэтому в заданной точке пространства принят сигнал с ограниченной энергией, поступившей в приемник за время τ , и измерены его параметры. Энергия этого ограниченного сигнала является основной величиной, определяющей реакцию приемника на сигнал. Интегрируя (7) приходим к следующему соотношению:

$$\Delta W(t) = K \cdot \Delta f_{ap}(t), \quad (8)$$

$$\text{где } K = [P_{D0} \cdot \tau \cdot \lambda \cdot L_2 \cdot V^{-2}] = \text{const},$$

$$\Delta f_{ap}(t) = f_{ap}(t+\tau) - f_{ap}(t),$$

$$\Delta W(t) = \int_t^{t+\tau} [P_D(t) - P_{D0}] dt.$$

Равенство (8) справедливо, если за время τ изменения функций $P_D(t)$ и $f_{ap}(t)$

не нарушают приближений геометрической оптики. Соотношение (8) показывает, что в радиозатменном эксперименте вариации энергии сигнала, обусловленные сжатием или расширением лучевого пучка, взаимосвязаны со смещением частоты сигнала, обусловленным изменением направления вектора Пойнтинга. Представленные аналитические соотношения (5)-(8) при всей их простоте и кажущейся очевидности больше 40 лет оставались незамеченными при интерпретации радиозатменных данных.

Соотношение (8), полученное аналитически из известных соотношений, устанавливает линейную связь между смещением частоты и изменением энергии, регистрируемой на интервале τ в процессе радиопросвечивания сферически-симметричной газовой оболочки планеты монохроматическим сигналом, коэффициент пропорциональности K является характеристикой зондирующей системы. Комбинации динамических переменных зондирующей системы, которые остаются постоянными $\Delta W(t)/\Delta f_{ap}(t) = \text{const}$ при медленном изменении ее параметров, называют [23,26] адиабатическими инвариантами. Выявление инварианта радиозатменного эксперимента определяет причинно-следственную связь корреляционного анализа независимых величин: рефракционных изменений мощности и частоты сигнала при зондировании системы *атмосфера-ионосфера*.

3. Метод диагностики слоистых структур

Способы решения обратной задачи радиопросвечивания атмосферы и ионосферы разные, но принцип определения $n(h)$ основан на интегральных связях функций $f_a(t)$, $f_p(t)$, $X_a(t)$, $X_p(t)$ с параметрами зондируемой среды [6-8]. В работах [20-22] показано, что при решении обратной задачи полученные сведения о малых вариациях $n(h)$ не всегда достоверны. В частности, вблизи нижней границы ионосферы Венеры в области протяженностью ~ 40 км (в интервале высот 75...115 км) недостаточная точность определения $n(h)$ в атмосфере и ионосфере ограничивает возможность изучения стратифицированных слоев. Для исследования системы *атмосфера-ионосфера*

необходим метод, использующий главное достоинство радиопросвечивания: непрерывную (за время 2...5 мин) регистрацию вариаций угла рефракции $\xi(t)$ по которому вычисляется профиль $n(h)$ вдоль вертикали от верхней границы ионосферы до облачного слоя атмосферы.

В разработанном методе для разделения влияния атмосферы и ионосферы можно использовать соотношение (1), выделяющее плазменный эффект $\delta f(t)$. По $\delta f(t)$ вычисляем изменение частоты, обусловленное влиянием ионосферы $f_p(t)$, затем из функции $f_D(t)$ определяем влияние атмосферы $f_a(t)$. Для выявления стратифицированных структур среды по формуле (6) вычисляем прогнозируемые рефракционные изменения в ионосфере $X_p(t)$ и атмосфере $X_a(t)$, которые затем сравниваем с экспериментальными функциями $X_D(t)$ и $X_C(t)$. Корреляция $X_a(t)$ с $X_D(t)$ и $X_C(t)$ свидетельствует о влиянии атмосферных слоев, корреляция $X_p(t)$ с $X_D(t)$ свидетельствует о влиянии ионизированных слоев. Отсутствие корреляции между вариациями $X_{ap}(t)$ и $X_D(t)$ укажет на доминирующее влияние шума и/или на неприменимость используемых приближений.

Надежным критерием обнаружения стратифицированных слоев в атмосфере является совпадение вариаций $X_a(t)$ с $X_D(t)$ или $X_C(t)$, а в ионосфере – совпадение вариаций $X_p(t)$ с $X_D(t)$ или $X_C(t)$. Кроме того, такие совпадения подтверждают правомерность применения лучевого приближения и сферической симметрии при решении обратной задачи, т.к. соотношение (6) выполняется только в рамках принятой модели. В экспериментах можно наблюдать корреляцию пульсаций $X_a(t)$, $X_p(t)$, $X_D(t)$, $X_C(t)$, не совпадающих по амплитуде. В этом случае исследуемые эффекты маскируются мешающими факторами, к которым относятся: недостаточно малый интервал τ , флуктуации сигнала из-за шума или турбулентности среды, поглощение или рассеяние радиоволн, нарушение применимости лучевого приближения или сферической симметрии. В таких случаях интерпретация данных требует тщательного анализа возможных источников погрешностей и обоснования достоверности полученной информации.

Подобная методика, использующая корреляцию интенсивности сигнала со второй производной фазового пути радиоволны ($\lambda=19$ см), применялась для анализа атмосферных и спорадических плазменных слоев околоземной оболочки [27]. Однако обоснование методики в работах [27,28] недостаточно корректное и экспериментальная апробация проводилась в слабоионизированной атмосфере Земли (ниже 120 км) с усреднением сильно флуктуирующих данных.

Принцип инвариантности, положенный в основу представленного метода, позволяет анализировать функциональные связи параметров зондирующих сигналов, не используя интегральных преобразований, применяемых при решении обратной задачи, что увеличивает чувствительность метода к малым вариациям показателя преломления среды. Инвариант радиозатменного эксперимента сохраняется при трансформации радиополя в процессе перемещения луча из плазмы в нейтральную среду, поэтому метод хорошо адаптирован к задачам обнаружения взаимосвязанных колебаний плотности среды в стратифицированной системе *атмосфера-ионосфера*.

4. Слоистые структуры в атмосфере и ионосфере Венеры

Для апробации метода использовали цифровые записи амплитуды поля двух когерентных сигналов КА ВЕНЕРА-15,-16 в 53 сеансах радиопросвечивания. Условия проведения экспериментов и новая методика цифровой обработки данных, увеличившая точность определения $f_p(t)$, $X_p(t)$, $X_D(t)$, $X_C(t)$, описаны в работах [19-21]. Рефракционное отклонение луча от прямой линии при зондировании ионосферы достигало величины 10 км, а в атмосфере Венеры ниже 65 км составляло десятки км.

На рис.2 показано, что в дневной ионосфере Венеры при $h=V \cdot t > 80$ км изменения $X_p(t)$ (кривые 1,3), вычисленные из частоты $f_p(t)$ по формуле (6), совпадают с вариациями мощности $X_D(t)$ (кривые 2,4). Различия сопоставимы с шумом, даже для сильно сфокусированного лучевого пучка ($h=128$ км на кривых 3,4) различие $X_p(t)$ и $X_D(t)$ не превышает случайных флуктуаций, что указывает на применимость однолучевого приближения, более детально

вопросы фокусировки рассмотрены в [29]. Совпадение $X_p(t)$ с $X_D(t)$ в ионосфере экспериментально подтверждает справедливость соотношений (6), (8) и существование адиабатического инварианта в радиозатменных экспериментах.

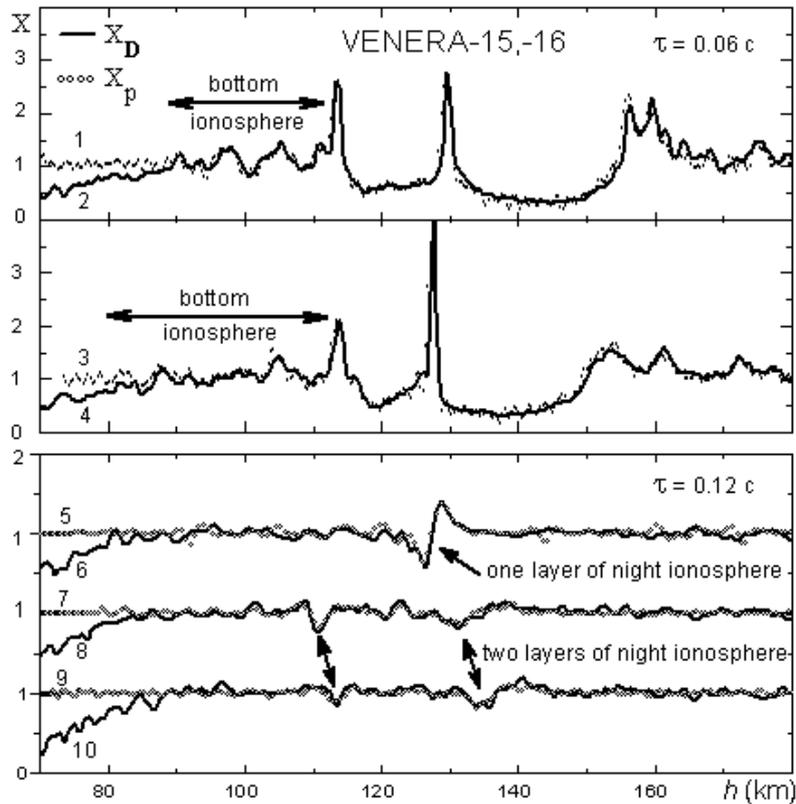


Рис.2. Сравнение $X_p(t)$ (точки) с $X_D(t)$ (сплошные кривые). По оси абсцисс – высота над поверхностью Венеры линии прямой видимости КА-Земля. В дневной ионосфере Венеры (кривые 1,2 и 3,4) многочисленные экстремумы $X_p(t)$ свидетельствуют о слоистой структуре ионосферы. В ночной ионосфере наличие одной (кривые 5,6) или двух (кривые 7,8 и 9,10) областей расфокусировки показывает существование и однослойной, и двухслойной ночной ионосферы Венеры.

Пульсации $X_D(t)$ на рис.2 обусловлены концентрацией лучевых пучков при пересечении границы слоя и расширением пучков при прохождении центра слоя, чередование максимумов и минимумов $X_p(t)$ (совпадающих с $X_D(t)$) демонстрирует наличие многочисленных стратифицированных структур в дневной ионосфере Венеры (кривые 1,2 и 3,4). Из-за недостаточной точности определения параметров радиоволн в других экспериментах

радиозондирования Венеры [6-12] этот эффект практически был неуловимым.

Разработанный метод однозначно выделил плазменные возмущения в радиозатменных данных, что позволило обнаружить [18] протяженную слабоионизованную нижнюю ионосферу Венеры при $80 < h < 115$ км. Оказалось, что нижняя ионосфера присутствует во всех 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. Во всех 25 сеансах при $92^\circ < Z < 160^\circ$ аналогичные слои плазмы на высотах $80 < h < 110$ км отсутствовали. Концентрация электронов $N(h)$ в максимумах обнаруженных слоев нижней ионосферы может составлять от 10^3 см^{-3} (порог для выявления вариаций $X_p(t)$ на фоне шума) до $2 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ (погрешность определения $N(h)$ при решении обратной задачи). Однако достоверный профиль $N(h)$ на высотах меньше 120 км получить трудно из-за ограниченной точности методики решения обратной задачи [20-22].

Предложенный метод не только установил отсутствие ионизации ниже 110 км в ночной ионосфере, но и доказал справедливость гипотезы существования однослойной и двухслойной ночной ионосферы Венеры [30,31]. Действительно, совпадение вариаций $X_D(t)$ с $X_p(t)$ на рис.2 (кривые 5-10) подтверждает применимость сферически-симметричного приближения. По-видимому, ниже 200 км нисходящий неоднородный поток ионов O^+ тормозится стратифицированной атмосферой и распределение $N(h)$ можно считать сферически-симметричным в телесном угле 5° . Подтверждением гипотезы является наличие на рис.2 (кривые 5-10) областей ослабления $X_p(t)$, указывающего на зондирование максимума ионизации слоя, и совпадение ослаблений $X_p(t)$ и $X_D(t)$, свидетельствующее о влиянии плазменного слоя, а не шума или асимметрии среды. Кривые 5,6 рис.2 показывают результат зондирования однослойной ионосферы, кривые 7-10 указывают на зондирование двухслойной ионосферы.

Достоинством метода является возможность обнаружения волновых явлений в системе *атмосфера-ионосфера*. Периодические вариации плотности

атмосферы и концентрации электронов повлияют на радиальный профиль $n(h)$ и, следовательно, можно наблюдать колебания параметров сигнала в процессе зондирования. На рис.3 (кривая 1) при $h < 85$ км четко видно периодическое чередование максимумов и минимумов $X_D(t)$. Корреляция $X_D(t)$ с $X_C(t)$ (кривые 1,2) и отсутствие корреляции с $X_p(t)$ (кривая 3) при $h < 85$ км указывают на влияние стратифицированных слоев именно в атмосфере. Большие флуктуации $X_C(t)$ обусловлены низкой мощностью передатчика СМ-сигнала, что уменьшает коэффициент корреляции $X_D(t)$ с $X_C(t)$.

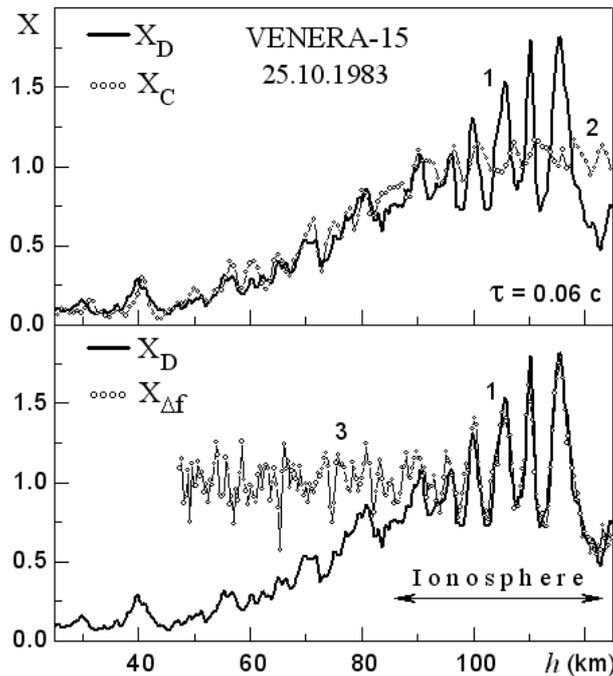


Рис.3. Сравнение рефракционного изменения $X_D(t)$ (сплошная кривая 1) с $X_C(t)$ (кривая 2) и сравнение $X_D(t)$ с вычисленным из частоты рефракционным изменением $X_p(t)$ (кривая 3) в эксперименте с КА ВЕНЕРА-15,-16. По оси абсцисс – высота над поверхностью Венеры линии прямой видимости.

На рис.3 (кривая 1) присутствуют колебания мощности $X_D(t)$ и в атмосфере ниже 85 км, и в ионосфере выше 85 км. Корреляция $X_D(t)$ с $X_p(t)$ заметна с высоты 85 км (кривые 1,3), амплитуда вариаций $X_D(t)$ и $X_p(t)$ совпадает, что свидетельствует о влиянии плазмы. Различие между функциями $X_D(t)$ и $X_p(t)$ уменьшается с ростом высоты h , т.к. уменьшается рефракционное ослабление сигнала в нейтральной атмосфере, влияющее на величину $X_D(t)$. Амплитуда

колебаний $X_p(t)$ увеличилась в ~ 3 раза при перемещении радиолуча от нижней границы ионосферы вверх на ~ 30 км. Периодические вариации $X_p(t)$ с вертикальным масштабом 6 км и закономерное увеличение амплитуды колебаний $X_p(t)$ при уменьшении на три порядка плотности атмосферы могут быть признаком вертикального волнового возмущения в ионосфере. Наличие колебаний электронной концентрации в нижней дневной ионосфере и отсутствие аналогичных колебаний в ночной ионосфере указывает на то, что гипотеза авторов [32] о метеорном происхождении таких возмущений плазмы не подтверждается.

5. Заключение

Показано, что совпадение между вариациями мощности сигнала, зарегистрированного в миссии ВЕНЕРА-15,16 при радиозатмении спутника, и рефракционным изменением мощности, рассчитанным по частоте зарегистрированного сигнала, может служить критерием применимости лучевого приближения при интерпретации радиозатменных данных. Выполнена валидация метода обработки данных радиозатмений спутников ВЕНЕРА-15,-16 и показана достоверность обнаружения многослойных структур на профилях электронной концентрации в нижней ионосфере Венеры по вариациям мощности и частоты сигнала в процессе радиопросвечивания. Выявленные колебания электронной концентрации в нижней дневной ионосфере могут быть признаком вертикального волнового возмущения в системе *атмосфера-ионосфера*. Отметим, что представленный метод диагностики можно применять для анализа стратифицированных структур во всех радиозатменных экспериментах на трассах связи *КА-КА* и/или *КА-Земля*: при радиопросвечивании атмосфер и ионосфер планет и Земли, а также при зондировании околосолнечной плазмы и кометных оболочек.

Работа выполнена при частичной поддержке программы № I.7П Президиума РАН.

Литература

1. Lusignan B., Modrell G., Morrison A. et al. Sensing the Earth's atmosphere with occultation satellites // Proc. IEEE. 1969. V. 57. № 4. P. 458.
2. Rangaswamy S. Recovery of atmospheric parameters from the Apollo/Soyuz-ATS-F radio occultation data // Geophys. Res. Letters. 1976. V. 3. № 8. P. 483.
3. Liu A.S. On the determination and investigation of the terrestrial ionospheric refractive indices using Geos-3 / ATS-6 satellite-to-satellite tracking data // Radio Sci. 1978. V. 13. № 4. P. 709.
4. D.D. Feng, B.M. Herman. Remotely Sensing the Earth's Atmosphere Using the Global Positioning System (GPS)—The GPS/MET Data Analysis // Journal of atmospheric and oceanic technology, 1999. V. 16, P. 989.
5. Kursinski E.R., Hajj G.A., Schofield J.T. et al. Observing Earth's atmosphere with radio occultation measurements using the global positioning system // Journal of Geophysical Research. 1997. V. 102. № 19. P. 23429-23465.
6. Kliore A., Gain D.L., Levy S. et al. Occultation experiments results of the first direct measurements of Mars atmosphere and ionosphere // Science. 1965. V. 149. № 3689. P. 1243-1250.
7. Kliore A.J., Levy G.S., Cain D.L., et al. Atmosphere and ionosphere of Venus from the Mariner 5 S-band radio occultation measurements // Science. 1967. V. 158. № 3809. P.1683-1688.
8. Tyler. G. L. Radio propagation experiments in the outer solar system with Voyager // Proc. IEEE. 1987. V. 75. P. 1404-1431.
9. Brace L.H., Kliore A.J. The structure of the Venus ionosphere // Space Science Reviews. 1991. V. 55. Jan.-Feb. 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. 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.

12. M. Patzold, B. Hausler, M. K. Bird et al. The structure of Venus' middle atmosphere and ionosphere // Nature. 2007. V. 450. № 29. P.657
13. Савич Н.А., Алтунин В.И., Андреев В.Е. и др. Двухчастотное радиозондирование кометы Галлея при пролете космических аппаратов Вега-1 и Вега-2 // Письма в Астрономический журнал. 1986. Т. 12. № 9. С. 675-682.
14. Pätzold M., Neubauer F.M., Andreev V.E., Gavrik A.L. Detection of the inner plasma pile-up region at comet Halley during the VEGA-1 flyby by the radio sounding experiment // Journal of Geophysical Research. 1997. V. 102. № A2. P. 2213-2222.
15. Гаврик А.Л., Вышлов А.С., Дорощук 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.
16. Савич Н.А., Азарх С.Л., Вышлов А.С. и др. Флуктуации частоты когерентных радиосигналов в околосолнечной плазме по данным аппаратов "Венера-15,16" // Космические исследования. 1987. Т. 25. № 2. С. 243-250.
17. А.Л. Гаврик, Ю.А. Гаврик, Л.Н. Самознаев. Неоднородная структура дневной ионосферы Венеры по данным радиопросвечивания при помощи станций Венера-15,-16 // Радиотехника и электроника. 2008. Т. 53. № 9. С. 1104-1111.
18. 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. Т. 2. № 12. С. 203-205.
19. 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.
20. Гаврик А.Л., Гаврик Ю.А., Самознаев Л.Н., Копнина Т.Ф. О возможности

радиовидения слоистых структур в экспериментах радиопросвечивания ионосфер планет // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2010. N5. С1. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/may10/1/text.pdf>

21. Гаврик А.Л. Использование радиосигнала L диапазона в экспериментах двухчастотного радиопросвечивания // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2011. N8. С2. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/aug11/1/text.pdf>
22. 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.
23. Ю.А Кравцов, Ю.И. Орлов. Геометрическая оптика неоднородных сред. М: Наука. 1980.
24. Young, A.T., Scintillations during occultations by planets, I, An approximate theory // Icarus. 1976. V. 27. № 3, P. 335-357.
25. Haugstad B.B. Effects of the inhomogeneous background on radiation propagating through turbulent planetary atmospheres // Radio Sci. 1978. V.13. P. 435-440.
26. А.С. Бакай, Ю.Т. Степановский, Адиабатические инварианты, Наукова думка, Киев, 1981.
27. Y.A. Liou, A.G. Pavelyev. Simultaneous observations of radio wave phase and intensity variations for locating the plasma layers in the ionosphere // Geophys Res Lett. 2006. V. 33. P. L23102.
28. A.G. Pavelyev, Y.A. Liou, J. Wickert et al. Eikonal acceleration technique for studying of the Earth and planetary atmospheres by radio occultation method // Geophys. Res. Lett. 2009. V. 36. P. L21807.
29. Илюшин Я.А., Гаврик А.Л., Гаврик Ю. А., Копнина Т. Ф. Моделирование радиозатменного эксперимента методом численного решения параболического уравнения дифракции // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2012. N3. С6. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/mar12/6/text.pdf>

30. 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.
31. 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.
32. 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.

Ссылка на статью:

А. Л. Гаврик, М. И. Бондаренко, А. А. Смыслов, Т. Ф. Копнина. Метод диагностики слоистых структур в атмосфере и ионосфере по данным радиопросвечивания. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №11. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/nov17/9/text.pdf>