

УДК 535.37:523.42

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАДИОСИГНАЛА L ДИАПАЗОНА В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ДВУХЧАСТОТНОГО РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЯ

А. Л. Гаврик

Институт Радиотехники и Электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал

Получена 2 августа 2011 г.

Аннотация. Обсуждаются достоинства использования радиосигнала L диапазона в экспериментах двухчастотного радиопросвечивания. Показано, что большое соотношение между влиянием плазмы на параметры сигнала L диапазона и аппаратными шумами обеспечило увеличение точности определения параметров ионосферы Венеры. Представлена новая методика детектирования плазменных слоев, увеличившая чувствительность метода радиопросвечивания к малым вариациям концентрации электронов и открывшая перспективы выявления волновых процессов в ионосферах планет.

Ключевые слова: радиопросвечивание, распространение радиоволн, ионосферы и атмосферы планет.

Abstract. We discuss advantages of using the L-band signal transmitted from an on-board equipment in a dual frequency occultation experiment. It is shown that a considerable ratio between plasma influence in the L-band signal parameters and equipment noises provides high precision of determination of Venus ionosphere parameters. Presented new method of plasma layers detection makes possible to detect small variations in electron density and reveals wave phenomena in the planets ionosphere during occultation.

Keywords: occultation, radio wave propagation, ionosphere and atmosphere of planets.

ВВЕДЕНИЕ

В течение длительного времени в нашей стране применялся радиосигнал L диапазона ($\lambda \approx 32$ см) для изучения космической плазмы методом радиозатмений [1]. С целью уменьшения влияния движения космического аппарата (КА) и

аппаратурных шумов на определение характеристик плазмы использовали метод дисперсионного интерферометра, комбинируя фазы сигналов L и S диапазонов [2]. В 1983 г. с борта КА ВЕНЕРА-15,-16 излучались когерентные сигналы трех диапазонов ($\lambda \approx 32, 8$ и 5 см) с целью исследования Венеры и радиосвязи КА с наземными пунктами [1,3-5]. Решение аналогичных научных и технических задач в США, странах ЕЭС и Японии обеспечивается когерентной комбинацией сигналов S ($\lambda=13.1$ см) и X ($\lambda=3.6$ см) диапазонов.

Различие в длинах волн L и S диапазонов предоставило отечественным экспериментам преимущества при изучении плазмы, т.к. изменения параметров сигнала, обусловленные влиянием плазмы, обратно пропорциональны либо частоте, либо квадрату частоты зондирующего сигнала. Использование сигнала L диапазона увеличивало по сравнению с S диапазоном рефракционные эффекты в плазме в 6 раз, а вариации частоты в 2.4 раза с уменьшением в 2.4 раза мешающих флуктуаций частоты, вызванных шумами бортового генератора [6]. Высокое соотношение между исследуемыми эффектами и аппаратурными погрешностями повысило точность отечественных экспериментов и открыло перспективы изучения тонкой структуры ионосферы [6-9].

Цель работы – показать на примере результатов радиопросвечивания ионосферы Венеры сигналами КА ВЕНЕРА-15,-16 необходимость продолжения использования сигнала L диапазона высокой мощности при планировании и реализации новых радиозатменных экспериментов в космических миссиях.

1. Методика экспериментов радиопросвечивания

Радиопросвечивание ионосферы планеты возможно в тех случаях, когда излучающий сигналы КА заходит за диск планеты или выходит из-за него, а наземный пункт регистрирует измененные плазмой сигналы. Метод радиозатмений использует связь обусловленных средой изменений частоты и амплитуды радиоволн с углом рефракции, который, в свою очередь, связан с профилем показателя преломления ионосферы и, следовательно, с электронной концентрацией $N(h)$. Метод дисперсионного интерферометра, основанный на

различии фазовых скоростей распространения радиоволн разных диапазонов в диспергирующей среде, устраняет вариации фазы сигнала, не связанные с влиянием плазмы, что увеличивает точность определения $N(h)$ при решении обратной задачи [3]. Метод детектирования слоистых структур, основанный на дисперсии радиоволн в плазме и линейной связи дифференциальных и интегральных параметров сигналов при двухчастотном радиопросвечивании ионосферы, позволяет изучать тонкую структуру ионизированной оболочки [6,8].

Условия проведения радиопросвечиваний ионосферы Венеры сигналами ДМ и СМ (длины волн 32 и 8 см) КА ВЕНЕРА-15,-16 изложены в работах [3-5,10,11]. Эти данные (170 сеансов) сопоставимы (в силу свойств метода радиозатмений) с данными просвечиваний КА ВЕНЕРА-9,-10, PIONEER-VENUS, MAGELLAN, VENUS-EXPRESS (всего ~650 сеансов). Совокупность данных является уникальным материалом для исследования влияния активности Солнца на характеристики ионосферы Венеры, поэтому результаты КА ВЕНЕРА-15,-16 были систематизированы и дополнили базу данных [12].

При решении известного интегрального уравнения, связывающего искомый профиль $N(h)$ с изменением частоты ДМ сигнала $\Delta f(h)$ [8,13], сначала из экспериментальной функции $\delta f(t)$, зависящей только от влияния плазмы, вычитается линейный тренд, обусловленный мешающими факторами. Затем, для определения $\Delta f(h)$, используется оригинальный итерационный алгоритм, учитывающий различие трасс распространения ДМ и СМ сигналов в ионосфере [8]. Далее, численным интегрированием функции $\Delta f(h)$ определяется $N(h)$. Интеграл имеет особенность, поэтому разработан оригинальный численный метод, уменьшающий погрешность расчета с 10% до 2% в области главного максимума ионизации и выше него [8,13]. Ниже максимума ионизации погрешности расчёта $N(h)$ быстро растут и могут превышать 100% [8].

Главным источником погрешностей метода радиозатмений являются вариации плотности межпланетной плазмы. Оценки показали, что для разных интервалов высот над поверхностью Венеры погрешности $N(h)$ значительно различаются: в верхней ионосфере они обычно меньше $3 \cdot 10^2 \text{ см}^{-3}$, в области

максимума ионизации они меньше 10%, ниже максимума $N(h)$ прогнозировать ошибки очень сложно, их величина, как правило, превышает 10^4 см^{-3} . Обусловленная несферичностью погрешность определения $N(h)$ в дневной ионосфере по данным КА ВЕНЕРА-15,-16 соизмерима с мешающим влиянием межпланетной плазмы [13]. В ночной ионосфере влияние асимметрии трудно исследовать из-за сильной изменчивости $N(h)$, поэтому до последнего времени ряд критиков полагали, что предположение о сферической симметрии ночной ионосферы необоснованно и именно из-за асимметрии возникают два максимума на профилях $N(h)$, рассчитанных по традиционной методике [4,11].

Следует отметить, что межпланетная плазма является главным источником погрешностей метода радиозатмений только тогда, когда ее влияние на фазу сигнала существенно превышает случайные флуктуации фазы, обусловленные ограниченной стабильностью излучаемых сигналов. Стабильный бортовой генератор позволяет излучать сигнал L диапазона с малыми аппаратными флуктуациями фазы, обеспечивая определение вариаций интегральной электронной концентрации на трассе связи с погрешностью меньше 10^{10} см^{-2} . Использование сигнала S диапазона для зондирования плазмы с малой концентрацией увеличит аппаратные флуктуации фазы в 2.4 раза и уменьшит в 2.4 раза искомые вариации фазы, т.е. уменьшит чувствительность метода в 6 раз по сравнению с использованием L диапазона. Для X диапазона чувствительность метода уменьшится в 100 раз, что не позволит изучать плазменные оболочки с малой концентрацией электронов, например кометы и ионосферы планет вблизи ионопаузы или на ночной стороне [14,15].

2. Результаты определения электронной концентрации

Диапазон зенитных углов Z_0 в радиозатменных экспериментах КА ВЕНЕРА-15,-16 составил $50^\circ \dots 160^\circ$, получено 73 профиля $N(h)$ в дневной ионосфере, 20 профилей вблизи терминатора и 62 профиля в ночной ионосфере [3-5,10,11], они вошли в созданную базу данных, часть которой уже является общедоступной [12]. На рис.1 и рис.2 показаны профили $N(h)$ для 2 интервалов

зенитных углов Солнца $50^\circ < Z_0 < 65^\circ$ (рис.1), $65^\circ < Z_0 < 75^\circ$ (рис.2).

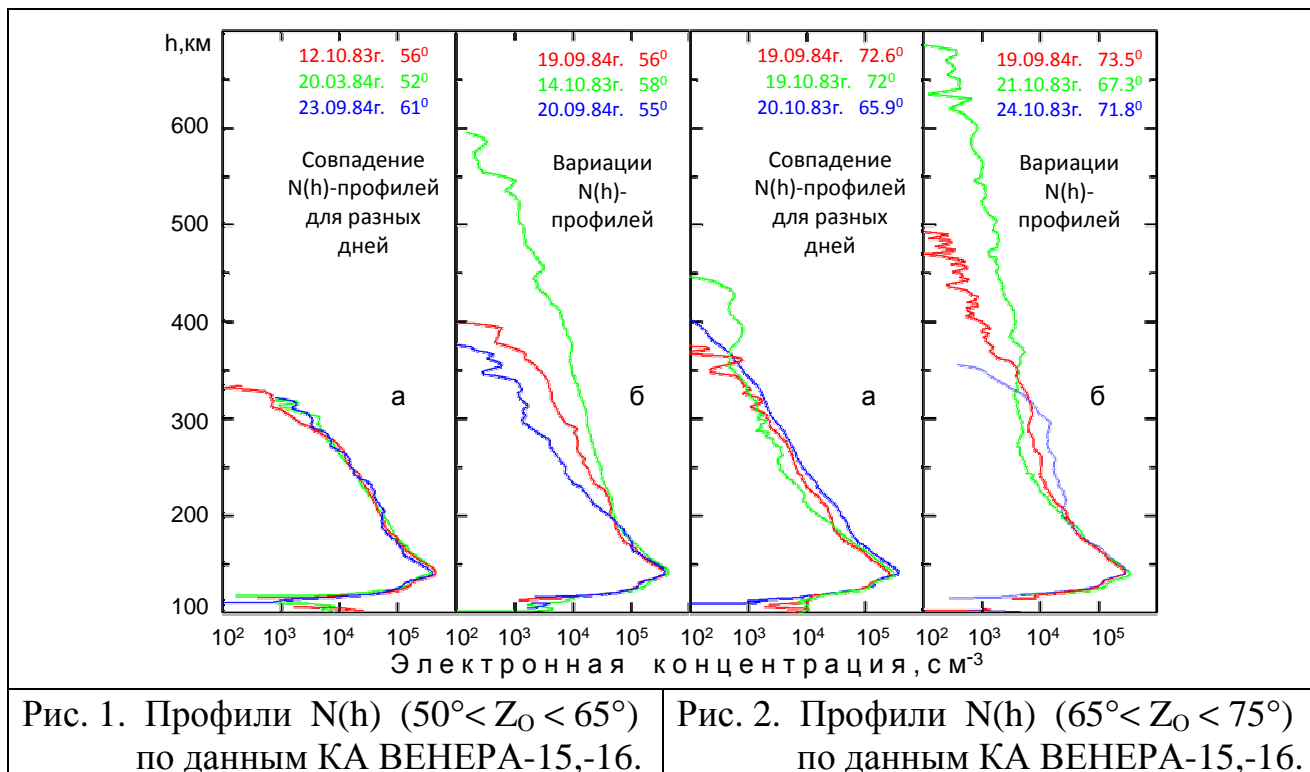


Рис. 1. Профили N(h) ($50^\circ < Z_0 < 65^\circ$) по данным КА ВЕНЕРА-15,-16.

Рис. 2. Профили N(h) ($65^\circ < Z_0 < 75^\circ$) по данным КА ВЕНЕРА-15,-16.

Область ниже ~160 км является областью фотохимического равновесия [16,17], выше ~180 км наблюдается увеличение плазменной шкалы высот профилей N(h), обусловленное влиянием диффузии ионосферной плазмы. Верхняя ионосфера нестационарная, в различные дни при близких значениях Z_0 меняются и высотная протяженность ионосферы h_i , и концентрация плазмы на одних и тех же высотах h, и шкала высот. В то же время на рис.1а и рис.2а показаны почти совпадающие N(h)-профили. Регулярное появление подобных профилей N(h) характеризует наиболее вероятное состояние ионосферы.

На рис.3 представлены профили N(h), полученные вблизи терминатора, а на рис.4 – профили N(h) в ночной ионосфере [4,5,11]. Особенностью ночной ионосферы является то обстоятельство, что профиль N(h) может иметь либо один максимум ионизации (рис.4б), либо два максимума (рис.4а) с разной концентрацией электронов. Изменчивость ночной ионосферы может быть связана с вариациями потока плазмы с дневной стороны на ночную сторону. Физические механизмы формирования дневной и ночной ионосферы [17,18] отличаются, поэтому вблизи терминатора чередуются проявления характерных особенностей N(h), наблюдавшихся как в дневной, так и в ночной ионосфере.

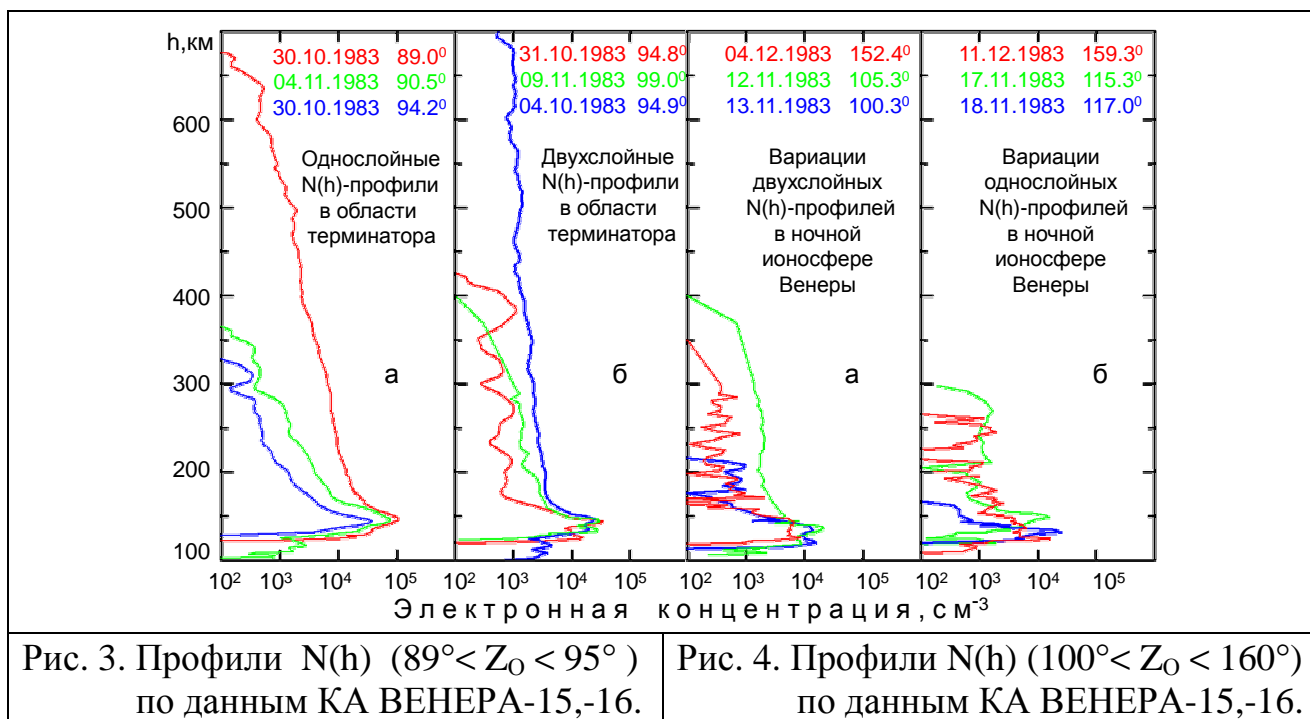


Рис. 3. Профили N(h) (89° < Z₀ < 95°) по данным КА ВЕНЕРА-15,-16.

Рис. 4. Профили N(h) (100° < Z₀ < 160°) по данным КА ВЕНЕРА-15,-16.

Когда вклад ионизирующего излучения Солнца в концентрацию плазмы преобладает, на профилях N(h) четко выражены и главный максимум N(h), и нижний максимум N(h) в виде перегиба профиля (рис.3а) с концентрацией на порядок меньше. Этот нижний слой, всегда присутствующий в дневной ионосфере, обусловлен поглощением мягкого рентгеновского излучения. Когда на образование ионосферы помимо солнечного излучения оказывает влияние процесс перетекания плазмы через терминатор с дневной стороны на ночную, распределения N(h) меняются. На рис.3б представлены профили N(h) с двумя максимумами, концентрации в максимумах сравнимы по величине, что является главным отличием области терминатора от дневной ионосферы. Из-за ионизации солнечным излучением верхний максимум в области терминатора всегда чуть больше по величине, чем нижний – в этом проявляется отличие от ночных условий. В ночной ионосфере верхний максимум N(h) может быть и меньше, и больше по величине, чем нижний максимум (рис.4а), т.к. механизмы их образования не связаны с поглощением солнечного излучения.

Пространственно-временные вариации потока плазмы с дневной на ночную сторону слабо изучены. Поэтому представляет интерес сравнить N(h)-профили, полученные почти одновременно в разных областях ионосферы или через сутки

в близких областях. На рис.5, рис.6 показаны $N(h)$ -профили, демонстрирующие изменчивость ночной ионосферы в высотном интервале $110 < h < 250$ км [5,11].

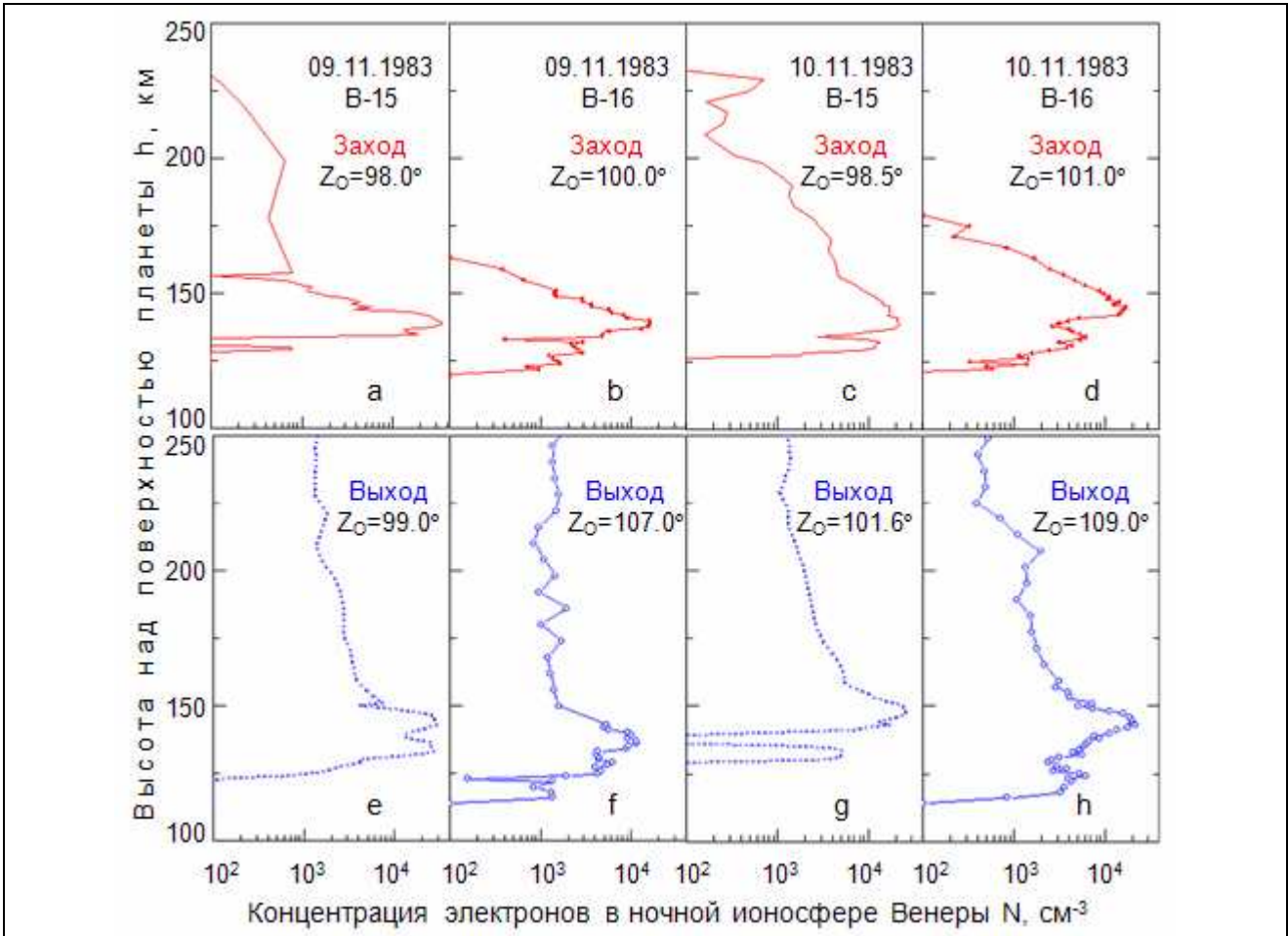


Рис. 5. Профили $N(h)$ в ночной ионосфере по данным радиозаходов (a-d) и восходов (e-h) КА ВЕНЕРА-15,-16, полученные 09 и 10 ноября 1983 г.

Одновременное нахождение около Венеры двух КА позволило осуществить 9.11.1983 и 10.11.1983 по 4 сеанса просвечивания ночной ионосферы, орбиты оказались такие, что моменты захода и восхода разных КА отличались на ~ 3 ч. Зондируемые области при заходе КА ВЕНЕРА-15 и КА ВЕНЕРА-16 отличались на $\sim 2.5^\circ$, а при выходе на $\sim 8^\circ$ [5,11]. Сравнение попарно распределений (a,b), (c,d), (e,f), (g,h) рис.5 показывает, что количественные характеристики ночной ионосферы Венеры (максимальная концентрация, высотная протяженность, шкала высот, форма профиля и т.д.) за время $\Delta t \approx 3$ ч изменяются.

В сеансах (a,b) и (c,d) зондируемые районы разнесены на ~ 200 км, это расстояние в 2 раза меньше длины пути радиолуча вблизи максимума $N(h)$ и

различия $N(h)$ свидетельствуют об отсутствии стационарности ионосферы. Но есть и определенное сходство, в сеансах (a,b) область максимума $N(h)$ узкая с малой шкалой высот над максимумом, а в сеансах (c,d) область максимума $N(h)$ широкая, шкала высот над максимумом большая и в обоих сеансах четко выражена двухслойность $N(h)$. Определенное сходство заметно и через 24 ч: в сеансах (a,c) протяженность слоя ионосферы 230 км, в сеансах (b,d) она меньше 180 км. Похожие характеристики $N(h)$ могут указывать на сходство механизмов формирования основного тела ночной ионосферы, а различия $N(h)$ – на пространственную или временную изменчивость источников ионизации.

На длительное (~24 ч) существование плазменных структур с похожими свойствами указывает сравнение сеансов (e,f) и (g,h), в которых области зондирования разнесены на ~800 км. Различия $N(h)$ достаточно большие, но во всех сеансах (e,f,g,h) протяженность основного тела ионосферы больше 250 км.

Возможность длительного (~24 ч) существования плазменных структур с похожими свойствами подтверждает и сравнение попарно сеансов (m,n), (p,q), (r,s) рис. 6. В сеансах (p,q) профили $N(h)$ очень похожи, а в сеансах (k,l) структура $N(h)$ не имеет сходства ни с одним из представленных профилей. На рис. 6 также видно, что 11.12.1983г. изменились свойства источника ионизации ночной ионосферы: в сеансах (m,n,r,s) наблюдается похожая сильно изрезанная структура $N(h)$ -профилей, резко отличающаяся от структуры $N(h)$ в сеансах (k,l,p,q). Если принять во внимание, что значения $N(h)$ ниже уровня 10^3 см^{-3} могут сильно искажаться мешающими факторами, то соответствие структуры $N(h)$ и шкалы высот ниже и выше максимума профилей (m,n) и (r,s) указывает на существование достаточно стабильных во времени источников ионизации.

Следует также отметить пространственную нерегулярность источников ионизации. Местоположение зондируемых областей в сеансах (k,p), (l,q), (m,r), (n,s) различалось на 50° , а время зондирования отличалось на 10...15 мин. Различия $N(h)$ в сеансах (k,p) и (l,q) очевидны. В сеансах (m,r) и (n,s) согласуются высотная протяженность и изрезанная структура $N(h)$, но форма профилей $N(h)$ вблизи максимума ионизации существенно различается.

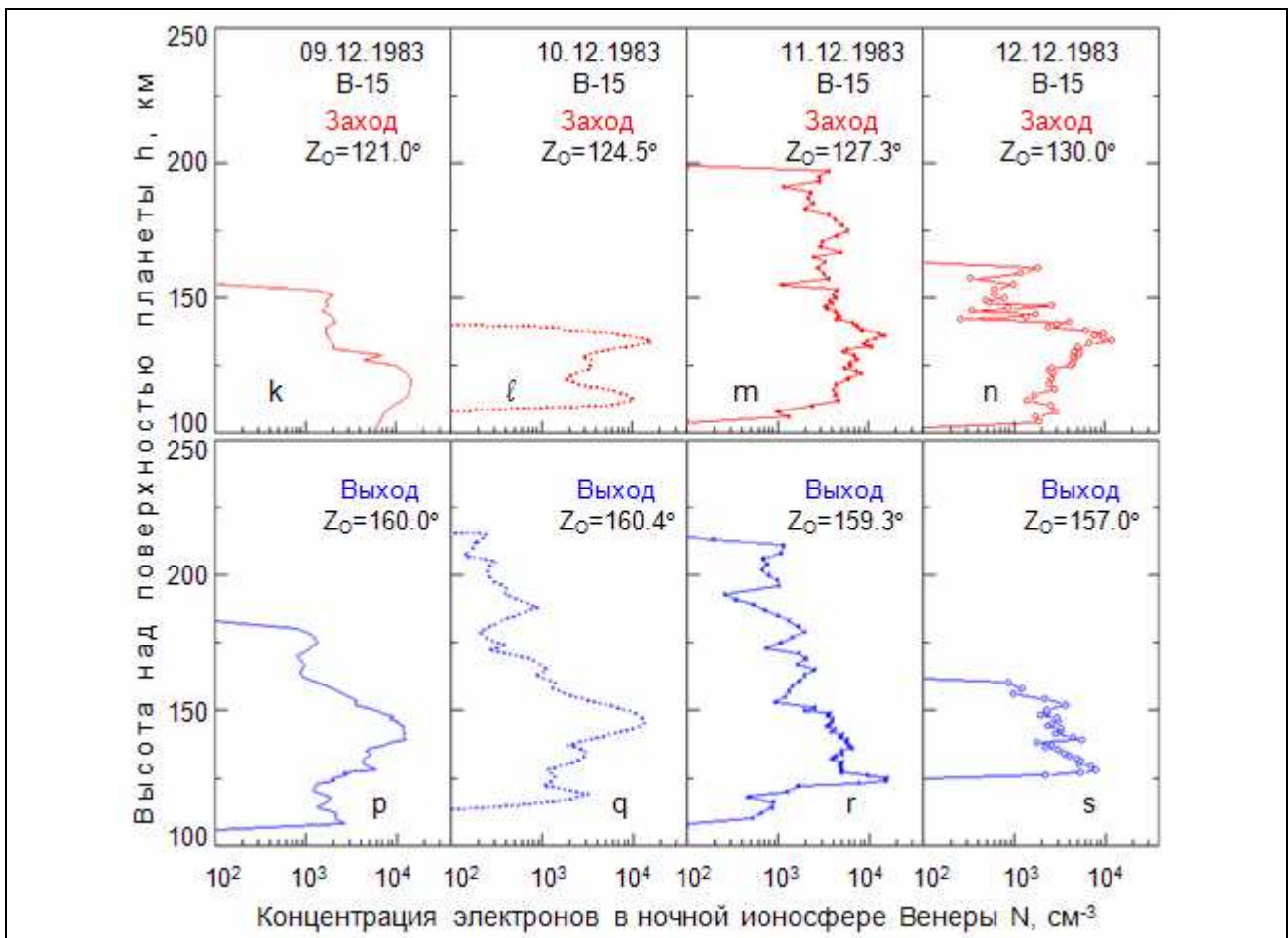


Рис. 6. Профили $N(h)$ в ночной ионосфере по данным радиозаходов (к-п) и восходов (р-с) КА ВЕНЕРА-15, полученные с 09 по 12 декабря 1983 г.

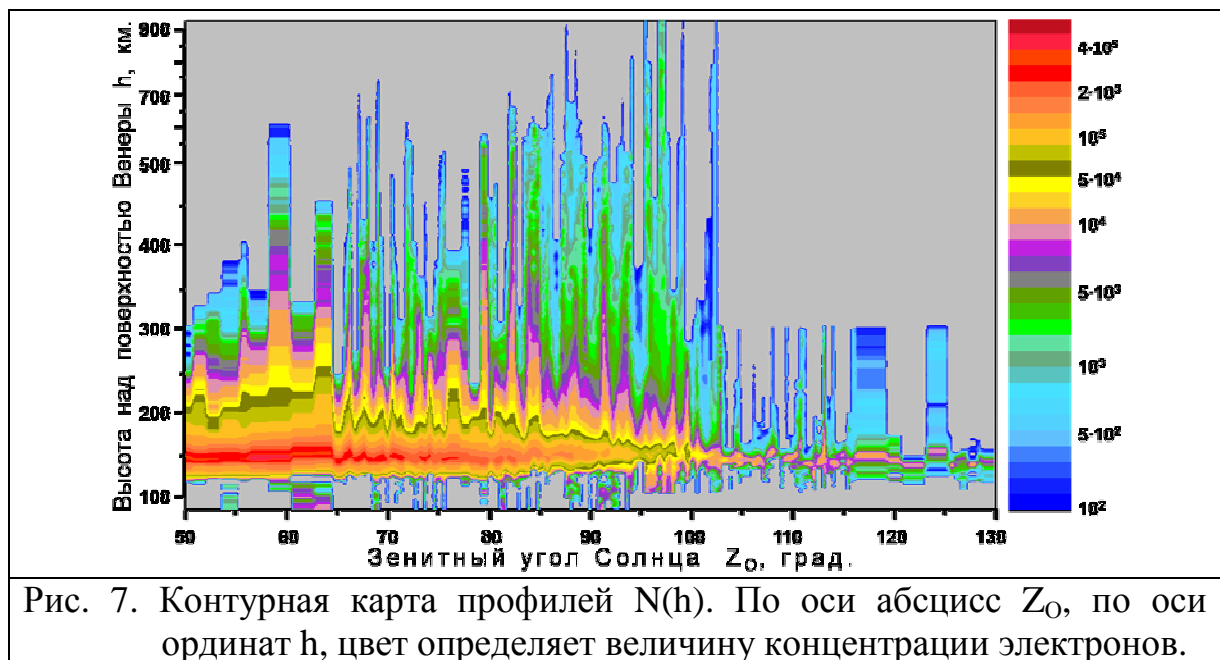
При низкой активности Солнца часто наблюдалась двухслойная ночная ионосфера [11], слои могут быть сильно разнесены по высоте (на 12...22 км), но могут и не иметь четкого разделения. Двухслойные профили получены по данным КА ВЕНЕРА-9,-10 в 15 (из 22) сеансах и по данным КА ВЕНЕРА-15,-16 в 33 (из 62) сеансах [11]. В большинстве случаев концентрация в нижнем максимуме N_ℓ меньше, чем в верхнем N_m , нижний максимум обычно нечетко выражен, он может проявляться в виде перегиба профиля $N(h)$. Величина N_ℓ иногда сравнима с погрешностью определения $N(h)$. Распределения, в которых оба слоя четко разделены по высоте и $N_m \approx N_\ell$ наблюдались меньше 10 раз, один из этих профилей показан на рис.5е, второй – на рис.6l. КА PIONEER-VENUS выявил очень мало двухслойных профилей (<20%) и в период максимальной, и в период минимальной активности Солнца [19]. Авторы радиозатменных экспериментов с КА VENUS-EXPRESS также не сообщают о регулярном

появлении двухслойной ионосферы в годы низкой активности [20].

Гипотеза авторов [11] об увеличении частоты появления двухслойной ионосферы при низкой активности Солнца не нашла подтверждений. Существенное различие качественных характеристик ночной ионосферы в экспериментах [4,19,20] может быть следствием пониженной чувствительности S и X диапазонов [19,20] к влиянию плазмы по сравнению с чувствительностью L диапазона [4], поэтому малая концентрация плазмы нижнего слоя ионосферы могла маскироваться аппаратурными шумами сигналов S и X диапазонов. Этот вопрос недостаточно исследован и требует более детального анализа, для которого необходимо увеличить соотношение между исследуемыми эффектами и аппаратурными погрешностями, используя при радиозатмениях L диапазон.

3. Закономерные вариации профилей концентрации электронов

Профили $N(h)$, полученные по данным КА ВЕНЕРА-15,-16, представлены на контурной карте (рис.7). На рис.7 видно закономерности, обусловленные увеличением Z_0 : увеличение высоты ионопаузы h_i от ~ 300 до ~ 1000 км при приближении к терминатору, резкое уменьшение h_i ночью, уменьшение концентрации в максимуме ионизации N_m на порядок при увеличении Z_0 и т.п.



Закономерные вариации $N(h)$ выявлялись во всех радиозатменных

экспериментах, не являются исключением и данные КА ВЕНЕРА-15,-16, представленные на рис.8, рис.9. В дневной ионосфере N_m уменьшается с ростом Z_0 (рис.8) из-за увеличения оптической толщи атмосферы, уменьшающей поток ионизирующего излучения Солнца. В области тени зависимость $N_m(Z_0)$ резко изменяется, при $95^\circ < Z_0 < 105^\circ$ падает скорость уменьшения N_m и увеличиваются флуктуации N_m относительно среднего. При $Z_0 > 105^\circ$ тенденция уменьшения N_m с ростом Z_0 слабо выражена из-за пространственно-временных вариаций N_m , которые могут быть следствием непостоянства параметров потоков плазмы с дневной стороны на ночную и потоков надтепловых электронов, формирующих ночную ионосферу [18]. Изменения этих потоков из-за влияния солнечного ветра могут оказаться главным фактором вариаций $N(h)$ в области тени и тогда закономерности вариаций N_m и других параметров $N(h)$ будут определяться не величиной Z_0 , а характеристиками солнечного ветра.

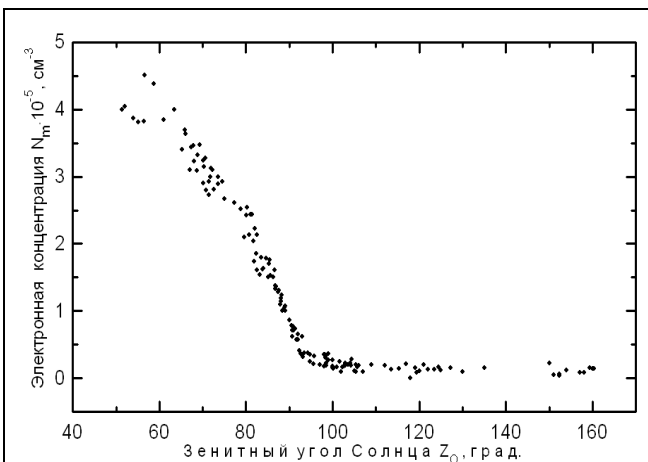


Рис. 8. Значения N_m по данным КА ВЕНЕРА-15,-16 при $50^\circ < Z_0 < 160^\circ$.

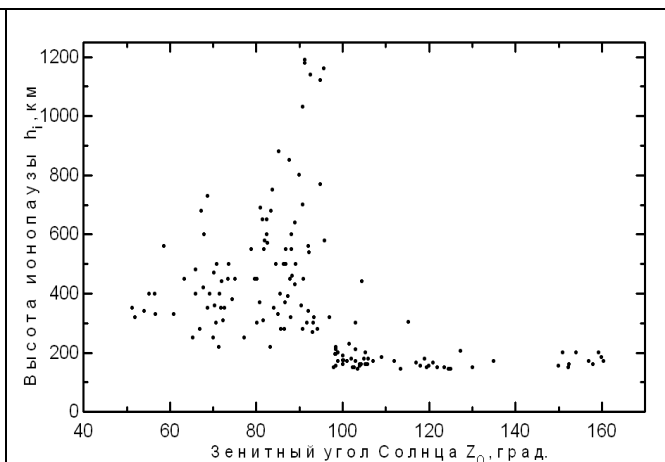


Рис. 9. Значения h_i по данным КА ВЕНЕРА-15,-16 при $50^\circ < Z_0 < 160^\circ$.

На рис.9 видно, что высота h_i на освещенной стороне при близких Z_0 меняется ото дня ко дню в широких пределах от ~ 280 км до ~ 800 км из-за изменения давления солнечного ветра [10]. Максимальная высота h_i наблюдается в области терминатора, но в области тени h_i резко уменьшается. Эти результаты отличаются и от прямых измерений [21], и от радиозатменных данных КА PIONEER-VENUS [19], и от данных КА VENUS-EXPRESS [20].

Данные прямых измерений указывают на то, что протяженность ночной ионосферы больше, чем в области терминатора, т.к. над основным слоем

ночной ионосферы располагается плазменный шлейф, простирающийся до 1500...3000 км [19,21]. Различие этих данных и данных радиозатмений связано и с вариациями параметров солнечного ветра, влияющих на ночную ионосферу, и с разными методическими погрешностями в разных экспериментах.

Анализ ошибок радиозатменных данных показал, что в дневной сферически симметричной ионосфере погрешности определения h_f в большинстве сеансов меньше 100 км [13]. Но плазменный шлейф ночной ионосферы нельзя считать сферически симметричным, если его считать цилиндрическим, то протяженная область плазмы с концентрацией электронов 10^3 см^{-3} не проявится в данных просвечивания. Метод радиозатмений эффективен, если в момент пересечения ионопаузы начинается увеличение интегральной электронной концентрации в процессе погружения луча в плазму, обусловленное увеличением произведения концентрации электронов и длины пути радиолуча в ионосфере. Такое условие выполняется лишь в области основного тела ночной ионосферы, где скорость нисходящего диффузионного потока ионов уменьшается из-за увеличения плотности атмосферы и растет концентрация электронов, т.е. создаются условия для образования сферически симметричной среды. При погружении луча в цилиндрический шлейф с многомасштабными неоднородностями мешающие факторы превышают малые регулярные приращения фазы сигнала, зависящие от приращений длины пути радиолуча и концентрации электронов.

Сравнение радиозатменных данных, имеющих сопоставимые погрешности, свидетельствует об увеличении протяженности и дневной, и основной области ночной ионосферы с увеличением активности Солнца [10,11]. В годы высокой активности дневная ионосфера становится на 100...300 км протяженнее из-за увеличения излучения Солнца и уменьшения давления солнечного ветра [10]. Основное тело ночной ионосферы также становится более протяженным при увеличении активности Солнца: при низкой активности рост концентрации электронов начинается с высоты 150...300 км [11], при высокой активности – с высоты 220...500 км. Достоверность деградации плазменной оболочки ночной ионосферы при уменьшении активности Солнца подтверждена сравнением

результатов прямых измерений протяженности плазменного хвоста [19-21].

Следует отметить, что из-за разной чувствительности радиосигналов разных диапазонов могут возникать расхождения в выводах о закономерных вариациях $N(h)$ в разных экспериментах. Так, по данным КА VENUS-EXPRESS [20] часто наблюдалась очень низкая протяженность дневной ионосферы, кроме того, возникали трудности выделения эффектов влияния ночной ионосферы, что, по-видимому, обусловлено малым влиянием плазмы с низкой концентрацией на фазу сигналов S и X диапазонов и большими аппаратурными флуктуациями фазы. Увеличение достоверности обнаруживаемых закономерных вариаций $N(h)$ может быть достигнуто только существенным увеличением соотношения между исследуемыми эффектами и инструментальными погрешностями, т.е. использованием в радиозатменных экспериментах сигнала L диапазона.

4. Применение метода детектирования слоистых структур в ионосфере

Наиболее полно достоинства сигнала L диапазона проявились после разработки метода детектирования плазменных слоев, использующего дисперсию радиоволн в плазме и теоретическое обоснование линейной связи рефракционного ослабления мощности зондирующей ионосферу радиоволны с градиентом частоты волны [6,8] для увеличения чувствительности метода радиозатмений к малым вариациям концентрации электронов. Разработанные критерии обеспечили разделение радиофизических эффектов, обусловленных влиянием плазмы, атмосферы и шума, что предоставило возможность выявления многослойных плазменных структур и в дневной, и в ночной ионосфере [6,8]. На рис. 8 представлены данные КА ВЕНЕРА-15,-16, свидетельствующие об эффективности нового направления исследований [6-9].

В отличие от метода дисперсионного интерферометра, основанного на анализе данных о фазе сигналов, разработанный метод, выявляет неизвестные ранее свойства ионосферы путем корреляции данных о мощности с градиентом частоты сигнала. Сравнение рефракционного ослабления ДМ сигнала $X_{DM}(t)$ с вычисленным ослаблением $X_{\Delta f}(t)=1+\beta*d/dt\{\Delta f(t)\}$ [6,8], представленное на рис.

10, указывает на отсутствие корреляции $X_{DM}(t)$ с $X_{\Delta f}(t)$ ниже 80 км, что свидетельствует об отсутствии влияния плазменных слоев, потому, что $\Delta f(t)$ зависит только от влияния плазмы. Разработанные критерии позволяют на высотах 80...110 км отделить плазменные эффекты от нарастающего в процессе погружения радиолуча влияния нейтральной атмосферы путем анализа $X_{DM}(t)$, $X_{CM}(t)$ и $X_{\Delta f}(t)$ [6,8]. Выше 80 км корреляция $X_{DM}(t)$ с $X_{\Delta f}(t)$ и многочисленные области фокусировки и расфокусировки радиолуча свидетельствуют о влиянии слоистых структур ионосферы.

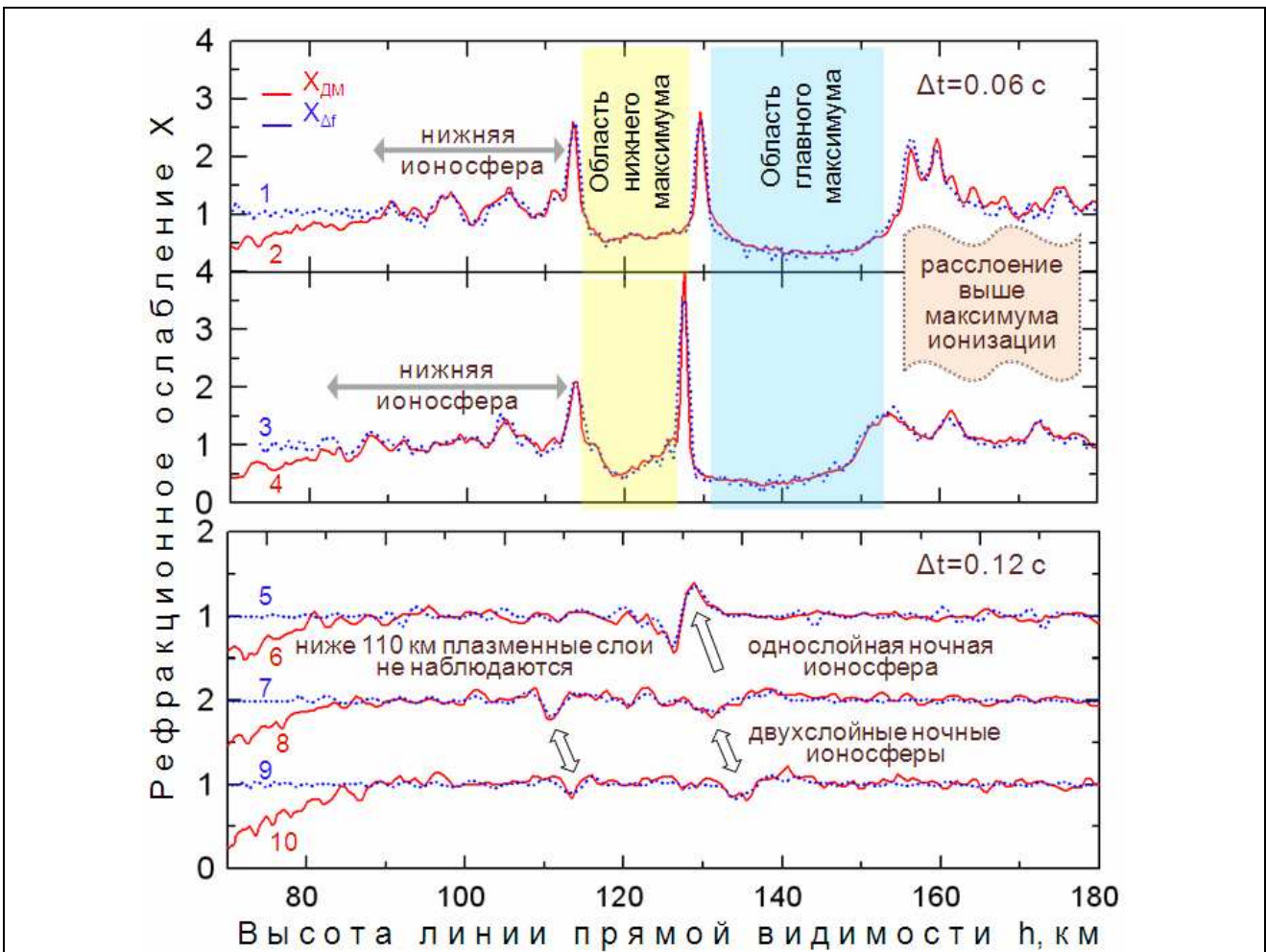


Рис. 10 Совпадение $X_{DM}(t)$ (сплошные кривые) с $X_{\Delta f}(t)$ (точки) в дневной ионосфере (кривые 1,2 и кривые 3,4) и многочисленные экстремумы свидетельствуют о слоистой структуре дневной ионосферы Венеры. Совпадение $X_{DM}(t)$ с $X_{\Delta f}(t)$ в ночной ионосфере и наличие одной (кривые 5,6) или двух (кривые 7,8 и 9,10) областей расфокусировки доказывает существование и однослойной и двухслойной ночной ионосферы Венеры.

Рис. 10 демонстрирует, что сильная фокусировка радиоволны с увеличением её мощности в ~3 раза (кривые 1,2) и в ~4 раза (кривые 3,4)

регулярно появляется на нижней границе слоя главного максимума (~130 км) из-за возникновения большого градиента электронной концентрации в дневной ионосфере. Рефракционные эффекты в нижней части дневной ионосферы и в ночной ионосфере на порядок слабее и обычно сравнимы с влиянием мешающих факторов, они могут быть выделены только с использованием разработанной методики детектирования плазменных слоев [6,8].

Доказательством существования плазмы на высотах 80...120 км является совпадение вариаций $X_{DM}(t)$ (кривые 2,4) с $X_{DF}(t)$ (кривые 1,3). Стабильное проявление аналогичных эффектов во всех сеансах просвечивания дневной ионосферы свидетельствует об обнаружении регулярно существующих нижних ионосферных слоев на высотах 80...120 км. При малых мешающих факторах нижняя область ионосферы наблюдалась во всех 19 сеансах для $56^\circ < Z_0 < 87^\circ$. В 7 сеансах из 9 при $87^\circ < Z_0 < 92^\circ$ нижняя ионосфера проявлялась, но эффект был сравним с шумами. Аналогичные структуры в ночной ионосфере во всех 25 сеансах при $92^\circ < Z_0 < 160^\circ$ отсутствуют. Обнаруженная нижняя часть дневной ионосферы Венеры может оказаться аналогом области D земной ионосферы.

Важно отметить, что новая методика не только обнаружила отсутствие нижней части ночной ионосферы, но и доказала возможность существования и однослойной, и двухслойной ночной ионосферы. Совпадение величины фокусировки $X_{DM}(t)$ с $X_{DF}(t)$ на кривых 5-10 рис.8 является важным аргументом, подтверждающим существование как однослойной (кривые 5,6), так и двухслойной (кривые 7,8 и 9,10) ночной ионосферы, кроме того, оно указывает на применимость сферически-симметричного приближения при расчетах профиля $N(h)$ на высотах $h < 200$ км.

Выявленная изменчивость нижней области дневной ионосферы может быть обусловлена волновыми процессами в атмосфере [8]. Волновые процессы могут оказаться и причиной расслоения ионосферы выше максимума ионизации, расслоение проявляется чередованием максимумов и минимумов $X_{DM}(t)$, совпадающих с $X_{DF}(t)$ (кривые 1-4). Ранее КА PIONEER-VENUS обнаружил очень редкое появление слоя «magnetic belt» на высотах 160...170 км

в сеансах с низкой ионопаузой при высоком давлении солнечного ветра [19]. Обнаруженное нами расслоение на высотах 150...180 км появляется регулярно, оно наблюдается и при низкой, и при высокой ионопаузе, кроме того, могут наблюдаться два или три слоя. Такие различия результатов КА PIONEER-VENUS и ВЕНЕРА-15,-16 могут быть следствием разных физических процессов, наблюдавшихся на высотах 160...180 км в разных экспериментах.

Таким образом, использование радиолинии L диапазона с высоким потенциалом и разработка высокоточных методов [6,8,15,22] открыли возможность обнаружения аномальных структур в ионосфере и волновых процессов, возникающих при воздействии возмущений на атмосферу и ионосферу. Волновая активность в газовой оболочке на высотах 65...120 км, вызывающая периодическое рефракционное усиление зондирующих сигналов при изменении высоты радиолуча над поверхностью планеты, может быть выделена путем корреляции $X_{DM}(t)$, $X_{SM}(t)$ и $X_{\Delta f}(t)$ [6,8], что позволит получать уникальную информацию о динамике атмосферы и ионосферы. Главным условием получения новой информации является обеспечение высокого потенциала радиолинии L диапазона при двухчастотном радиопросвечивании.

Представленные результаты свидетельствуют о необходимости продолжения использования сигнала L диапазона высокой мощности при планировании и реализации новых радиозатменных экспериментов в космических миссиях, т.к. высокое соотношение между исследуемыми эффектами и аппаратурными погрешностями значительно увеличит точность определения ионосферных характеристик и обеспечит возможность получения малоизвестной информации о тонкой структуре ионосфер планет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что метод радиозатмений наиболее эффективен при излучении с борта КА сигнала L диапазона высокой мощности, это позволяет наиболее достоверно определять параметры плазменной оболочки при решении обратной задачи двухчастотного радиопросвечивания и выявлять закономерности их

вариаций, связанные с изменением космической погоды, благодаря высокому соотношению между исследуемыми радиофизическими эффектами и инструментальными погрешностями.

Показано, что наиболее полно достоинства сигнала L диапазона выявляются в методе детектирования плазменных слоев, использующем дисперсию радиоволн в плазме и теоретически обоснованную линейную связь рефракционного ослабления мощности зондирующей ионосферу радиоволны с градиентом частоты волны для увеличения чувствительности метода радиозатмений к малым вариациям концентрации электронов.

Показано, что высокое соотношение между исследуемыми радиофизическими эффектами и инструментальными шумами для сигнала L диапазона позволяет использовать разработанные критерии разделения радиофизических эффектов, обусловленных влиянием плазмы, атмосферы и шума для выявления многослойных плазменных структур и в дневной, и в ночной ионосфере. Более того, корреляция дифференциальных и интегральных параметров когерентных радиоволн оказалась новым эффективным средством выявления аномальных структур и волновых процессов в ионосфере и атмосфере.

Работа выполнена при частичной поддержке программы ОФН РАН № VI.15 "Плазменные процессы в Солнечной системе".

ЛИТЕРАТУРА

1. Арманд Н.А., Гуляев Ю.В., Гаврик А.Л., Ефимов А.И., Матюгов С.С., Павельев А.Г., Савич Н.А., Самознаев Л.Н., Смирнов В.М., Яковлев О.И. Результаты исследований солнечного ветра и ионосфер планет радиофизическими методами // Успехи физических наук. 2010. Т. 180. № 5. С. 34-40. http://ufn.ru/ufn10/ufn10_5/Russian/r105j.pdf
2. Савич Н.А., Васильев М.Б., Гаврик А.Л. Дисперсионные интерферометры с пространственно разнесенными излучателями и приемниками // Радиотехника и электроника. 1981. Т. 24. № 2. С. 305-310.
3. Савич Н.А., Андреев В.Е., Вышлов А.С., Гаврик А.Л., Конофалов В.П., Лаптев Н.В., Мармулев В.А., Местэртон А.П., Набатов А.С., Орлов Ю.Н.,

- Осмоловский И.К., Самознаев Л.Н., Штерн Д.Я. Дневная ионосфера Венеры по данным радиозатмений спутников "Венера-15,16" в 1983 г. // Радиотехника и электроника. 1986. Т. 31. № 11. С. 2113-2120.
4. Савич Н.А., Андреев В.Е., Вышлов А.С., Гаврик А.Л., Конофалов В.П., Лаптев Н.В., Мармулев В.А., Местэртон А.П., Набатов А.С., Осмоловский И.К., Самознаев Л.Н., Штерн Д.Я. 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.
 5. 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.
 6. 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. <http://www.maikonline.com/maik/showArticle.do?auid=VAG762MEP3&lang=ru>
 7. Gavrik A.L., Pavelyev A.G., Gavrik Yu.A. Detection of ionospheric layers in the Daytime Ionosphere of Venus at Altitudes of 80-120 km from VENERA-15 and -16 Two-Frequency Radio-Occultation Results // Geomagnetism and Aeronomy. 2009. V. 49. № 8. P. 1223-1225. DOI: 10.1134/S0016793209080362. <http://www.springerlink.com/content/a212563728825476/fulltext.pdf>
 8. Гаврик А.Л., Гаврик Ю.А., Самознаев Л.Н., Копнина Т.Ф. О возможности радиовидения слоистых структур в экспериментах радиопросвечивания ионосфер планет // Журнал радиоэлектроники. 2010. № 5. С. 1-14. <http://jre.cplire.ru/jre/may10/1/text.pdf>
 9. 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. <http://www.maikonline.com/maik/download.do?uid=VAFKCB4Y1V&ptype=401&dtype=pdf>
 10. 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.
 11. Осмоловский И.К., Самознаев Л.Н. Распределение электронной концентрации в ночной ионосфере Венеры по данным радиопросвечивания // Космические исследования. 1987. Т. 25. № 2. С. 292-300.
 12. A. L. Gavrik, Yu. A. Gavrik, P. Withers, S. Joy, Venera 15 and 16 Radio Occultation Ionospheric Electron Density Profiles, Version 1.0, V15/V16-V-ROE-5-OCC-ELECTRON-DENS-V1.0, NASA Planetary Data System, 2010. <http://ppi.pds.nasa.gov/>
 13. 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.
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., Гаврик Ю.А., Копнина Т.Ф. О возможности увеличения чувствительности метода радиопросвечивания // Журнал радиоэлектроники. 2011. № 5. С. 1-18. <http://jre.cplire.ru/jre/may11/3/text.pdf>
 16. Gavrik A.L., Ivanov-Kholodny G.S., Mikhailov A.V., Savich N.A., Samoznaev L.N. The formation of the daytime Venusian ionosphere: the results of dual-frequency occultation experiments // Space research. 1980. V. 20. P. 231-235.
 17. 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.
 18. Гаврик А.Л., Осмоловский И.К., Самознаев Л.Н. Анализ условий образования ночной ионосферы Венеры по данным радиопросвечивания // Космические исследования. 1986. Т. 24. № 4. С. 620-630.
 19. Brace L.H., Kliore A.J. The structure of the Venus ionosphere // Space Science Reviews. V. 55. Jan.-Feb. 1991. P. 81-163.
 20. Pätzold M., Tellmann S., Häusler B., Bird M.K., Tyler G.L., Christou A.A., Withers P. A sporadic layer in the Venus lower ionosphere of meteoric origin // Geophysical Research Letters. 2009. V. 36. L05203. doi:10.1029/2008GL035875.
 21. Venus-II: Geology, Geophysics, Atmosphere and Solar Wind Environment / Ed. by Bourgher S.V., Hunten D.M., Philips R.J. University of Arizona Press. Tucson.1997.
 22. Pavelyev, A.G., Liou Y.A., Wickert J., Gavrik A.L., and Lee C.C. Eikonal acceleration technique for studying of the Earth and planetary atmospheres by radio occultation method // Geophys. Res. Lett. 2009. V. 36. P. L21807. DOI:10.1029/2009GL040979. <http://hrsl.csrsl.ncu.edu.tw/DOCUMENTS/Paper/2009GL040979.pdf>