

О ВОЗМОЖНОСТИ РАДИОВИДЕНИЯ СЛОИСТЫХ СТРУКТУР В ЭКСПЕРИМЕНТАХ РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЯ ИОНОСФЕР ПЛАНЕТ

А. Л. Гаврик, Ю. А. Гаврик, Л. Н. Самознаев, Т. Ф. Копнина

ФирЭ им. В.А. Котельникова РАН

Получена 27 апреля 2010 г.

Аннотация. Рассматривается возможность увеличения чувствительности метода радиозатмений с целью обеспечения радиовидения слоистых структур в экспериментах двухчастотного радиопросвечивания ионосфер планет.

Ключевые слова: радиовидение, метод радиопросвечивания, ионосфера.

К настоящему времени 9 миссий космических аппаратов провели ~800 просвечиваний ионосферы Венеры, 20% выполнены станциями ВЕНЕРА-15,-16 [1-3], получены профили концентрации электронов $N(h)$ и выявлены закономерности вариаций $N(h)$ при изменении активности Солнца [4,5]. Для интерпретации данных радиопросвечивания обычно используется апробированная методика, в которой распределение $N(h)$ связано с измеряемыми параметрами радиосигналов интегральными уравнениями, поэтому методика расчетов, предполагающая непрерывность и гладкость функций, чувствительна к нестационарностям в экспериментальных данных. Главными источниками погрешностей являются вариации фазы в межпланетной плазме и ионосфере Земли, горизонтальные градиенты электронной концентрации и ошибки интегрирования зашумленных данных. Эти мешающие факторы приводят к большой систематической погрешности на малых высотах при использовании измерений фазы радиосигнала для определения $N(h)$ путем решения обратной задачи радиопросвечивания [6,7]. Теоретический анализ показал, что возможности метода радиопросвечивания могут быть расширены. Новые технологии позволяют достоверно разделить влияние шума, ионосферной плазмы и нейтральной атмосферы на результаты

радиопросвечивания, что обеспечивает возможности обнаружения и исследования тонкой структуры ионосферы [8,9].

Применение в эксперименте со станциями ВЕНЕРА-15,-16 цифровой системы регистрации позволило через 25 лет восстановить цифровые записи напряженности поля двух когерентных сигналов станций ВЕНЕРА-15,-16 с целью более точных измерений огибающей и фазы радиосигналов для достижения предельно высокой точности и разрешающей способности при получении характеристик ионосферы. В данной работе показано, что развитие высокочувствительной технологии радиовидения слоистых структур увеличивает потенциал метода радиопросвечивания и обеспечивает качественно новый уровень исследования структуры ионосферы, т.к. разработанные методы позволяют обнаруживать влияние ионизованных слоев и исследовать неизвестные ранее свойства ионосферы Венеры.

Распределение электронной концентрации по данным радиопросвечивания.

Двухчастотное радиопросвечивание ионосферы Венеры было проведено в период с 12.10. 1983 по 24.09.1984 [1-3]. Антенна г. Евпатория (Украина) принимала когерентные радиосигналы спутников ВЕНЕРА-15,-16 с длинами волн 32 см (ДМ) и 8 см (СМ), штатная аппаратура обеспечивала усиление, гетеродинирование и фильтрацию сигналов. Затем сигналы поступали в комплекс аппаратуры дисперсионного интерферометра [10], который осуществлял узкополосную фильтрацию с помощью следящих фильтров. Напряженности поля сигналов ДМ (1 ± 0.06 кГц) и СМ (4 ± 0.12 кГц) с полосовых фильтров дисперсионного интерферометра кодировались двухканальным 8 разрядным аналого-цифровым преобразователем с частотой дискретизации ~ 0.55 кГц и записывались на магнитную ленту. Именно эти данные через много лет были перезаписаны на современные носители информации и переобработаны.

В усовершенствованной методике цифровой обработки [11] для обнаружения сигнала использовалась гребёнка фильтров, реализованная с помощью быстрого преобразования Фурье. Оценка параметров обнаруженного сигнала применялась для формирования опорного комплексного колебания, которое обеспечило компенсацию вариаций частоты сигнала путем цифрового гетеродинирования. При определении параметров сигнала анализировались квадратурные компоненты комплексного колебания, полученные с выхода согласованного фильтра, по которым определялись мощность $W(t)$ и фаза $\varphi(t)$ комплексного колебания. Оценка разности фаз $\varphi(t+\Delta t)-\varphi(t)$ является приращением фазы за время Δt и определяет отклонение частоты сигнала $f_{\Delta}(t)=(\varphi(t+\Delta t)-\varphi(t))/4\pi \Delta t$ от центральной частоты фильтра. Методом последовательных приближений вариации частоты полностью устраняются путем гетеродинирования и достигается минимально возможное значение $f_{\Delta}(t)$, что обеспечивает максимальное увеличение отношения сигнал/шум на выходе фильтра и получение оптимальных оценок мощности и частоты сигнала с точностью, близкой к теоретическим ограничениям. Оценки мощности $W(t)$ почти не искажаются формой частотной характеристики фильтра и размытием спектральной линии сигнала, т.к. на последней стадии измерений сигнал находится в центре согласованного фильтра и его частота не меняется. Благодаря этому нормированные значения $W(t)$ правильно определяют рефракционное ослабление сигнала $X(t)$ в просвечиваемой среде (при отсутствии поглощения радиоволн). Оценки частоты сигнала $f(t)$ находятся из частоты опорного колебания, использовавшегося для гетеродинирования, с учетом поправки $f_{\Delta}(t)$. Высокая точность измерения $f(t)$ уменьшает погрешности вычисления $N(h)$ при решении обратной задачи радиопросвечивания и увеличивает точность вычисления производной $f(t)$ численными методами. Проверка методики осуществлялась моделированием, погрешность определения $f(t)$ не превышала $\sim 10^{-3}$ Гц, а погрешность определения $W(t)$ не превышала $\sim 2\%$, если отношение сигнал/шум в полосе 1

Гц находилось в пределах $10^4 \dots 4 \cdot 10^2$, что соответствует условиям проведения экспериментов со спутниками ВЕНЕРА-15,16.

Ранее, в 1984 г., по результатам экспериментов были определены профили электронной концентрации $N(h)$ в ионосфере Венеры при $120 < h < 1000$ км [1-3]. Влияние мешающих факторов на $N(h)$ можно понять путем моделирования эксперимента радиопросвечивания. На рис.1а показано (сплошная кривая) модельное распределение $N(h)$ в дневной ионосфере. Этот профиль представляет собой сглаженный экспериментальный профиль, полученный по данным КА ВЕНЕРА-9 для $Z_0=14^\circ$ [12]. Он аппроксимирован при $h > 120$ км в аналитическом виде тремя слоями Чепмена. На этот профиль накладываются ещё два слоя Чепмена, которые предположительно могут характеризовать поведение $N(h)$ в нижней ионосфере. Полученное модельное распределение $N(h)$ является гладкой функцией с непрерывной производной.

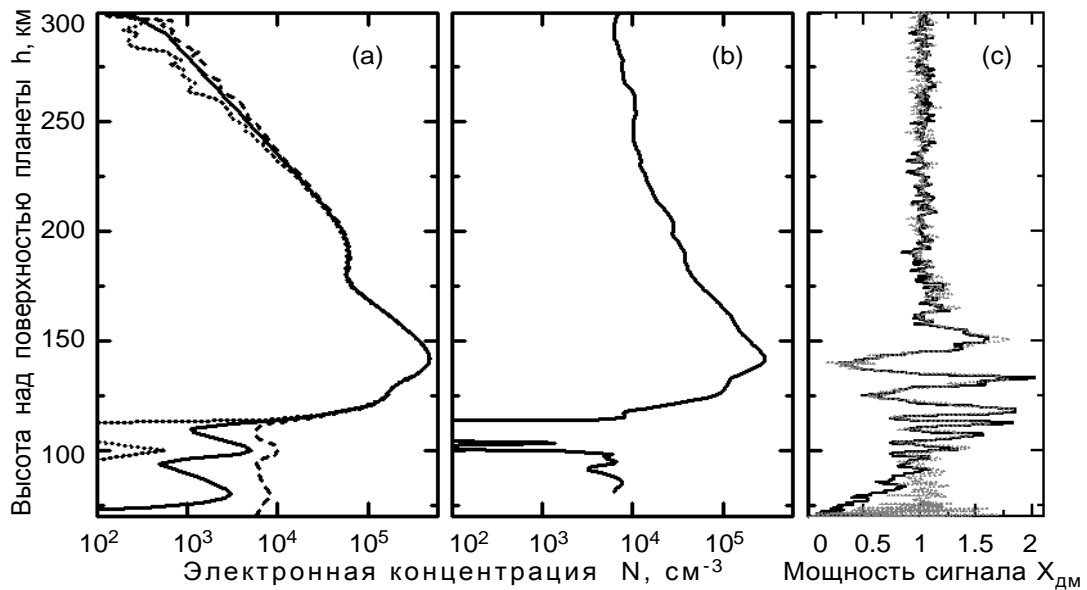


Рис.1. Сравнение результатов моделирования эксперимента радиопросвечивания с экспериментальными данными. (а) – Расчеты $N(h)$ при наличии погрешностей в $\Delta f(h)$ показывают либо большую положительную концентрацию (пунктир), либо отрицательную концентрацию с тонкими положительными пиками (точки), причем ошибка определения $N(h)$ в несколько раз больше истинного значения $N(h)$ (сплошная кривая). (б) – $N(h)$ -профиль, полученный при радиопросвечивании 25.10.1983, демонстрирует сложность определения $N(h)$ ниже 120 км. (с) – Совпадение вариаций $X_{дм}(h)$

(сплошная кривая) с $X_{\Delta f}(h)$ (кривая из точек) в сеансе 25.10.1983 свидетельствует о наличии плазменных слоев в интервале высот 85...200 км.

По модельным значениям $N(h)$ находились высотные зависимости частот f_1 и f_2 для ДМ- и СМ-сигналов, а затем вычислялась приведенная разность $\delta f = 16/15 (f_1 - f_2/4)$, зависящая только от влияния плазмы. К функции $\delta f(h)$ добавлялись случайные вариации: белый шум и малая регулярная величина δf_0 , характеризующие мешающее влияние плазмы на трассе связи [13]. Из вариаций $\delta f(h)$ определялось изменение частоты $\Delta f(h)$ ДМ-сигнала. По значениям $\Delta f(h)$ находился с помощью преобразования Абеля новый профиль $N(h)$, отличающийся от модельного. На рис.1а показаны два таких профиля, найденные при двух значениях δf_0 , равных по абсолютной величине и противоположных по знаку. Из данных рис.1а видно, что рассчитанные значения электронной концентрации при $h < 120$ км могут быть в несколько раз больше (пунктир), чем модельные значения (сплошная кривая), или могут принимать отрицательные значения (точки), даже если мешающие факторы невелики и их влияние на $N(h)$ при $h > 130$ км не превышает 2%.

Именно из-за влияния мешающих факторов невозможно сделать правильные выводы о концентрации электронов в сеансе 25.10.1983, для которого $N(h)$ -профиль представлен на рис.1б. Действительно, ниже 115 км на профиле $N(h)$ наблюдается быстрое уменьшение $N(h)$ до отрицательных значений. Этот эффект можно интерпретировать как прохождение нижней границы ионосферы, а появление положительных значений $N(h)$ ниже 100 км может характеризовать погрешности определения $N(h)$. Но в данном сеансе 25.10.1983 такая интерпретация не соответствует действительности. На рис.1с показано совпадение вариаций мощности с рефракционным ослаблением, вычисленным из частоты сигнала, доказывающее, как это будет показано далее, существование нижней части ионосферы в диапазоне высот 85...115 км. Этот пример демонстрирует, что в нижней ионосфере концентрация $N(h)$ может меняться от 10^3 до 10^4 см⁻³, но традиционные методы определения $N(h)$ приводят к ошибкам, не позволяющим вычислить достоверный $N(h)$ -профиль в

нижней части ионосферы. О погрешностях определения $N(h)$ в нижней ионосфере свидетельствуют и представленные на рис.2 $N(h)$ -профили, полученные по данным сеансов радиовыходов спутников ВЕНЕРА-15,-16 [1] для зенитных углов Солнца 59° , 72° , 67° и 81° (14, 19, 21, 25 октября 1983 г.).

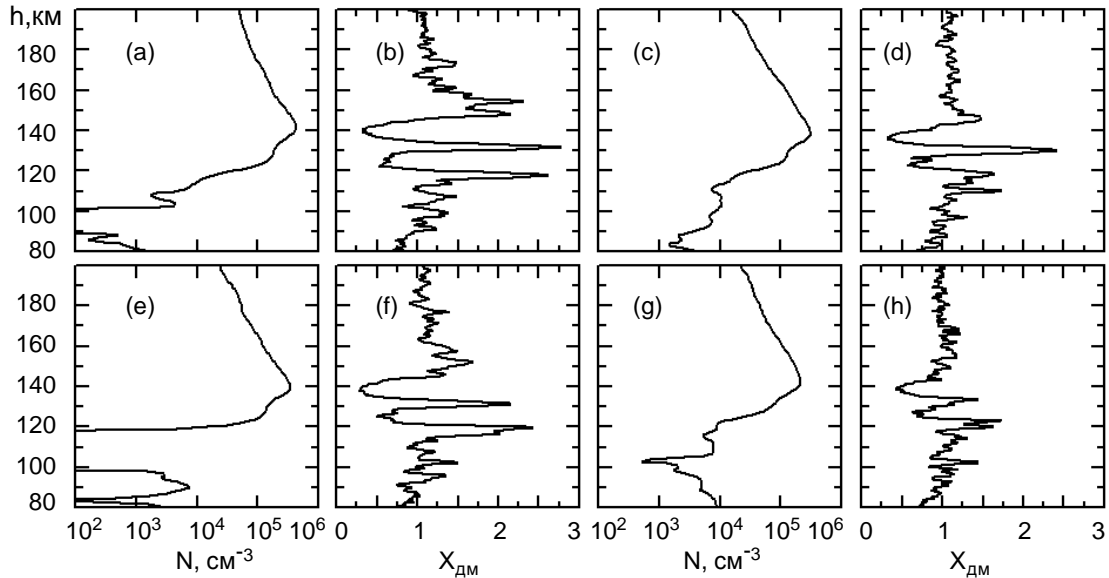


Рис.2. Высотные распределения электронной концентрации $N(h)$, полученные по данным радиопросвечивания в сеансах 14.10.1983 (a), 19.10.1983 (c), 21.10.1983 (e) и 25.10.1983 (g), а также зависимости (b, d, f, h) мощности ДМ-сигнала $X(h)$ от высоты радиолуча над поверхностью планеты h , полученные в тех же сеансах.

На рис.2а электронная концентрация резко уменьшается при $h < 100$ км (на рис.2е – при $h < 120$ км) до отрицательных значений, а затем снова становится положительной. Можно было бы предположить, что эти высоты являются нижней границей ионосферы, но в высотном интервале $80 \dots 120$ км на рис.2b,2f наблюдаются сильные вариации $X(h)$, указывающие на возможное существование ионосферных слоёв на высотах вплоть до 80 км. Иное поведение $N(h)$ наблюдается на рис.2c,2g – вплоть до 80 км электронная концентрация не исчезает. Вариации $X(h)$ на рис.2d,2h при $h < 120$ км немного меньше, чем на рис.2b,2f, но также указывают на возможное существование нижних ионосферных слоёв. Результаты анализа показали, что ни одно из представленных распределений $N(h)$ при $h < 120$ км нельзя считать достоверным

из-за влияния систематических погрешностей. Однако, полученные максимальные значения $N(h)$ в высотном интервале 80...120 км можно рассматривать и в качестве оценки погрешности $N(h)$, и в качестве верхней оценки электронной концентрации в нижней области ионосферы.

Результаты моделирования и экспериментальные данные свидетельствуют о том, что для дневной ионосферы Венеры преобразование Абеля позволяет находить электронную концентрацию с малой погрешностью для высот $h > 120$ км. Значения $N(h)$ в нижней ионосфере, полученные с помощью преобразования Абеля, могут рассматриваться лишь в качестве оценки погрешности определения $N(h)$ в этой области. Действительно, быстрое уменьшение $N(h)$ при $h < 120$ км до малых или даже до отрицательных значений не является критерием прохождения нижней границы ионосферы. Важно также, что отсутствие быстрого уменьшения электронной концентрации при $h < 120$ км, которое часто наблюдается на экспериментальных $N(h)$ -профилях вплоть до очень низких высот, не является критерием наличия ионосферной плазмы на этих высотах. Такие эффекты могут быть обусловлены систематическими погрешностями метода решения обратной задачи радиопросвечивания, причем погрешность, вносимая мешающими вариациями интегральной электронной концентрации на трассе связи, может коренным образом исказить распределение $N(h)$, определяемое с помощью преобразования Абеля в нижней области дневной ионосферы Венеры. Мы считаем, что именно по этой причине результаты расчетов $N(h)$ по данным станции VENERA-EXPRESS [14] не выявили нижнюю дневную ионосферу в 70% сеансов, а представленные авторами [14] сведения о нижней части ионосферы Венеры могут оказаться недостоверными.

Обнаружение слоистых структур в ионосфере Венеры

Нами разработан высокочувствительный метод [7-9], обеспечивший возможность детектирования слоев с малой концентрацией ионосферной плазмы. Этот радиофизический метод предоставляет возможность

радиовидения слоистых образований в ионосфере и существенно увеличивает информативность метода радиопросвечивания. Наш подход базируется на выявленной теоретической связи вариаций независимых параметров радиосигналов и прецизионном определении огибающей и фазы когерентных радиосигналов. Установленная взаимосвязь вариаций мощности и частоты определяется соотношением [7,9]:

$$X(t) = 1 + \frac{c \cdot L}{f_0 V_{\perp}^2} \cdot \frac{d}{dt} \Delta f(t),$$

где c – скорость света, L – расстояние от спутника (КА) до перицентра линии прямой видимости КА, $V_{\perp} = dh/dt$ – вертикальная компонента скорости захода или выхода КА, f_0 – частота несущей, t – время, $\Delta f(t)$ – изменение частоты и $X(t)$ – изменение рефракционного ослабления зондирующего радиосигнала, обусловленные влиянием плазмы.

Из представленного соотношения, которое длительное время ускользало от внимания исследователей, следует важный вывод: при просвечивании регулярных структур ионосфер планет вариации $X(t)$ будут всегда прямо пропорциональны вариациям градиента частоты. А это означает, что чувствительность к градиентам $N(h)$ одинаковая и для амплитудных и для частотных данных, но источники шума для амплитудных и частотных данных разные, т.е. некоррелированные, что позволяет выделять эффекты влияния плазмы на фоне шума. Но для экспериментального подтверждения установленной взаимосвязи необходимы высокие точности измерений мощности, частоты и скорости изменения частоты радиосигналов.

Точные измерения огибающей и фазы двух когерентных сигналов не только обеспечивают проверку теоретического соотношения, но и надежно разделяют влияние плазмы, атмосферы и шума на результаты радиопросвечивания [7]. Для анализа необходимо определить из экспериментальных данных зависимости рефракционных ослаблений двух сигналов $X_{DM}(t)$ (32 см) и $X_{CM}(t)$ (8 см) в функции времени и получить приведенную разность частот $\delta f(t)$ из измерений фазы сигналов [1,10]. По вариациям $\delta f(t)$ можно восстановить

вариации частоты ДМ-сигнала $\Delta f(t)$ и вычислить прогнозируемое рефракционное ослабление ДМ-сигнала $X_{\Delta f}(t)$:

$$X_{\Delta f}(t) = 1 + \frac{c \cdot L}{f_0 V_{\perp}^2} \cdot \frac{d}{dt} \Delta f(t).$$

Совпадение вариаций рефракционного ослабления $X_{DM}(t)$ радиосигнала с вариациями $X_{\Delta f}(t)$ будет свидетельствовать о влиянии регулярных структур исследуемой ионосферы, что является следствием полученного соотношения: вариации градиента частоты зондирующего сигнала при радиопросвечивании ионосферы всегда будут линейно связаны с вариациями мощности сигнала. Отсутствие такой связи будет свидетельствовать о влиянии шума либо неучтенных факторов. Анализ корреляции $X_{DM}(t)$ с $X_{\Delta f}(t)$ особенно важен при исследовании разреженной среды, где эффекты сравнимы по величине с флуктуациями шума.

На рис. 3 представлено сравнение вариаций $X_{DM}(h)$ с вариациями $X_{CM}(h)$ и $X_{\Delta f}(h)$. Вариации $X_{DM}(h)$ совпадают с вариациями $X_{\Delta f}(h)$ на высотах $h > 90$ км (рис. 3а, 3в), ниже 90 км начинается нарастающее влияние атмосферы и рассогласование $X_{DM}(h)$ с $X_{\Delta f}(h)$.

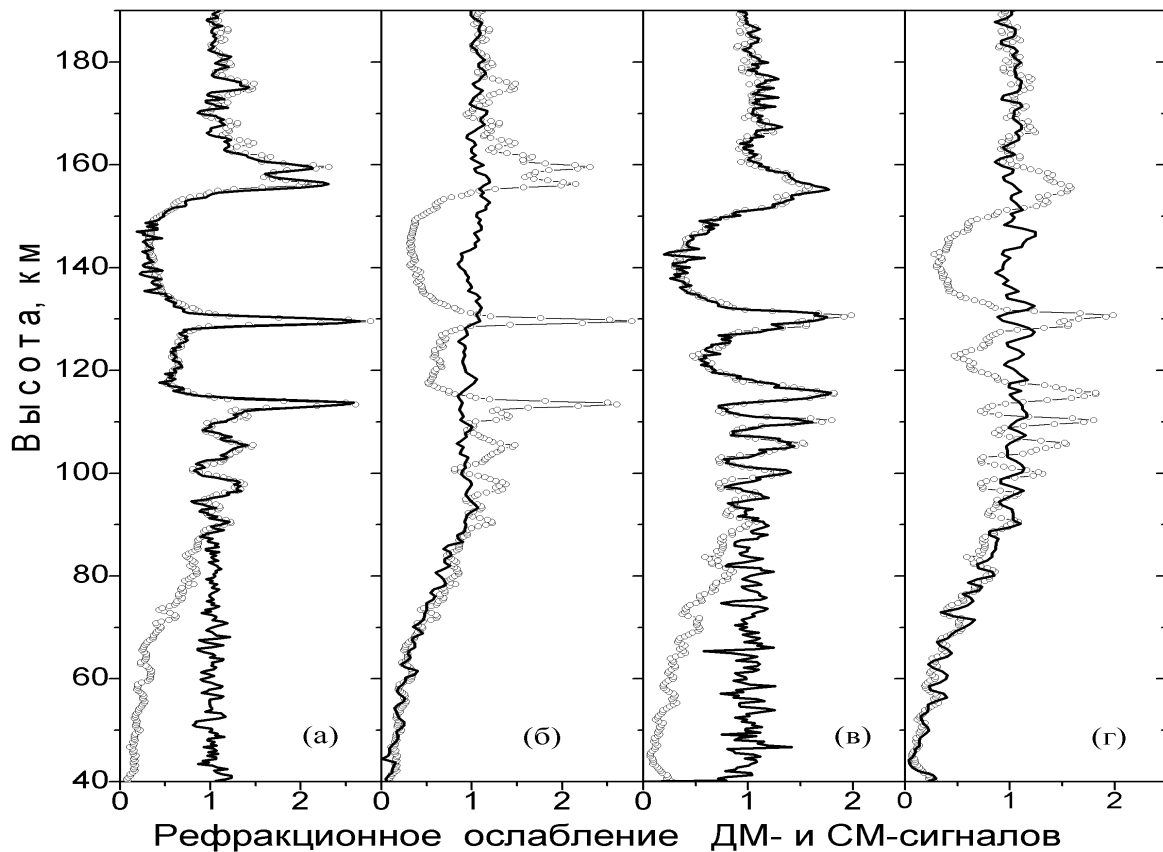


Рис.3. Влияние ионосферы Венеры на рефракционное ослабление: кривая из точек - $X_{DM}(h)$, сплошная кривая для (а), (в) - $X_{\Delta f}(h)$, сплошная кривая для (б), (г) - $X_{CM}(h)$. По вертикальной оси - высота h линии прямой видимости КА над поверхностью Венеры, по горизонтальной оси - шкала для X в относительных единицах, 1 соответствует отсутствию влияния ионосферы и атмосферы.

(а) и (б) Выход 14.10.1983г. станции Венера-15, зенитный угол Солнца 58.7° , $\Delta t=0.058$ с.

(в) и (г) Выход 25.10.1983г. станции Венера-15, зенитный угол Солнца 73.5° , $\Delta t=0.058$ с.

На рис. 3а в области высот 155...180 км проявляется слоистая структура ионосферы, она характеризуется наличием максимумов и минимумов $X_{DM}(h)$, обусловленных значительным увеличением градиента электронной концентрации в области максимумов $X_{DM}(h)$. На высоте 130 км наблюдается фокусировка и увеличение мощности сигнала в 3 раза, а на высотах 90...115 км четко обнаруживаются максимумы и минимумы $X_{DM}(h)$, обусловленные нижними слоями ионосферной плазмы. О влиянии именно плазмы, а не мешающих факторов, свидетельствует совпадение вариаций $X_{DM}(h)$ с $X_{\Delta f}(h)$. Стабильное проявление аналогичных радиоэффетов во всех сеансах

радиопросвечивания дневной ионосферы Венеры свидетельствует о том, что обнаруженные ионосферные структуры присутствуют регулярно.

На рис. 3б вариации $X_{DM}(h)$ не коррелированы с вариациями $X_{CM}(h)$ выше 90 км, т.к. влияние плазмы на рефракционное ослабление СМ-сигнала в 16 раз меньше и сравнимо по величине с флуктуациями шума из-за низкого отношения сигнал/шум. Ниже 90 км рефракционное ослабление, обусловленное атмосферой, одинаковое для ДМ- и СМ-сигналов.

Наиболее ярко выраженное существование нижних слоев в ионосфере Венеры наблюдалось 25.10.1983. На рис. 3в максимумы и минимумы $X_{DM}(h)$ и $X_{DF}(h)$ в диапазоне высот 85...115 км совпадают – влияют плазменные слои. При $h < 90$ км наблюдаются чередования максимумов и минимумов X_{DM} , свидетельствующие о формировании слоистой структуры верхней атмосферы в период проведения этого радиопросвечивания. Чередование максимумов и минимумов $X_{DM}(h)$ согласуется с вариациями $X_{CM}(h)$ при $h < 90$ км (рис. 3г), что подтверждает существование слоистых образований в атмосфере. Разделение вкладов атмосферы и ионосферы в вариации $X_{DM}(h)$ позволит в дальнейшем понять физические механизмы, ответственные за формирование периодической структуры слоев одновременно и в верхней атмосфере и в нижней ионосфере.

Другой особенностью этого сеанса радиопросвечивания (рис. 3в) является то, что расслоение ионосферы на высотах 155...180 км слабо выражено и только в 2 раза усиливается мощность сигнала при фокусировке, причем $X_{DM}(h)$ аномально слабо меняется при изменении интервала измерений Δt . Возможно, что такая особенность связана с формированием периодической структуры слоев в ионосфере.

Таким образом, сравнение $X_{DM}(h)$ с $X_{DF}(h)$ и $X_{CM}(h)$ оказалось хорошим инструментом для разделения вкладов атмосферы, ионосферы и шума, что обеспечило возможность радиовидения слоистых структур в эксперименте радиопросвечивания ионосферы Венеры. Разработанная методика позволила достоверно выделить влияние плазмы из данных радиопросвечивания станций ВЕНЕРА-15,16 и обнаружить слабоионизованный нижний слой [5]. Нижняя

часть дневной ионосферы Венеры наблюдается регулярно. При малых мешающих факторах нижняя область ионосферы наблюдалась во всех обработанных 19 сеансах 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 шумами. Во всех 25 сеансах при $92^{\circ} < z < 160^{\circ}$ аналогичные слои плазмы не наблюдались. Следовательно, параметры нижней части ионосферы Венеры зависят от z . Значительная изменчивость обнаруженной нижней области ионосферы может быть обусловлена волновыми процессами в верхней атмосфере и нижней ионосфере. В нижней ионосфере концентрация $N(h)$ может меняться от 10^3 до 10^4 см⁻³, но традиционные методы определения $N(h)$ приводят к ошибкам, не позволяющим получить достоверное распределение $N(h)$ в нижней области. Возможно, именно по этой причине станция ВЕНЕРА-ЭКСПРЕСС не выявила нижнюю дневную ионосферу в 70% сеансов [14].

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ (07-02-00514-а) и программы ОФН РАН № VI.15. Авторы выражают благодарность Н.А. Арманду за обсуждение полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Савич Н.А., Андреев В.Е., Вышков А.С. и др. Дневная ионосфера Венеры по данным радиозатмений спутников "Венера-15,16" в 1983 г. // Радиотехника и электроника. 1986. Т. 31. № 11. С. 2113-2120.
2. Савич Н.А., Андреев В.Е., Вышков 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.
3. Савич Н.А., Андреев В.Е., Вышков 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.

4. 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.
5. 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.
<http://adsabs.harvard.edu/abs/1986KosIs..24..620G>
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. 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.
8. 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.
<http://ru.iszf.irk.ru/images/b/bc/203-205.pdf>
9. Гаврик А.Л., Гаврик Ю.А., Самознаев Л.Н. 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](http://www.maikonline.com/maik/download.do?uid=VAFKCB4Y1V&ptype=401&dtype=pdf)
10. 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.

11. 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.
12. 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.
13. Андреев В.Е., Вышлов А.С., Гаврик А.Л. и др. Характеристики радиосигналов при радиопросвечивании кометы Галлея // Радиотехника и электроника. 1990. Т. 35. № 5. С. 1035-1043.
14. Pätzold M., Tellmann S., Häusler B. et al. A sporadic layer in the Venus lower ionosphere of meteoric origin // Geophysical Research Letters. 2009. V. 36. L05203. doi:10.1029/2008GL035875