

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, alg248@ire216.msk.su

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

Радиопросвечивание ионосфер планет базируется на теории, в которой распределение электронной концентрации $N(h)$ связано с измеряемыми параметрами радиосигналов интегральными уравнениями [1,2]. Методика расчетов, предполагающая непрерывность и гладкость функций, чувствительна к нестационарностям в экспериментальных данных. Поэтому общепринятое использование измерений фазы радиосигнала для определения $N(h)$ путем решения обратной задачи радиопросвечивания приводит к большой систематической погрешности на малых высотах в области разреженной плазмы [3,4]. Главными источниками погрешностей являются вариации фазы в межпланетной плазме и ионосфере Земли, горизонтальные градиенты $N(h)$ и ошибки интегрирования зашумленных данных.

Результаты численного моделирования эксперимента радиопросвечивания ионосферы Венеры, представленные на рис. 1, показывают, что невозможно определить достоверное распределение $N(h)$ при $h < 120$ км, даже если мешающие факторы невелики и их влияние при $h > 130$ км не превышает 2%. Рассчитанные значения $N(h)$ могут оказаться как положительными, так и отрицательными при $h < 120$ км, а ошибка $N(h)$ может на порядок превышать истинное значение $N(h)$. Действительно, на рис.1 видно, что рассчитанные значения электронной концентрации в области ниже 120 км могут быть (пунктирная кривая) в несколько раз больше, чем истинный профиль $N(h)$ (сплошная кривая), следовательно может быть сделан ошибочный вывод о наличии плазменных слоев с высокой электронной концентрацией. На рис.1 также видно, что рассчитанные значения электронной концентрации в области ниже 120 км могут становиться отрицательными с отдельными узкими пиками незначительной положительной концентрации (кривая из точек), следовательно может быть сделан ошибочный вывод об отсутствии плазмы ниже 120 км.. Таким образом, применение традиционной методики определения $N(h)$ может привести к недостоверным выводам о нижней области ионосферы.

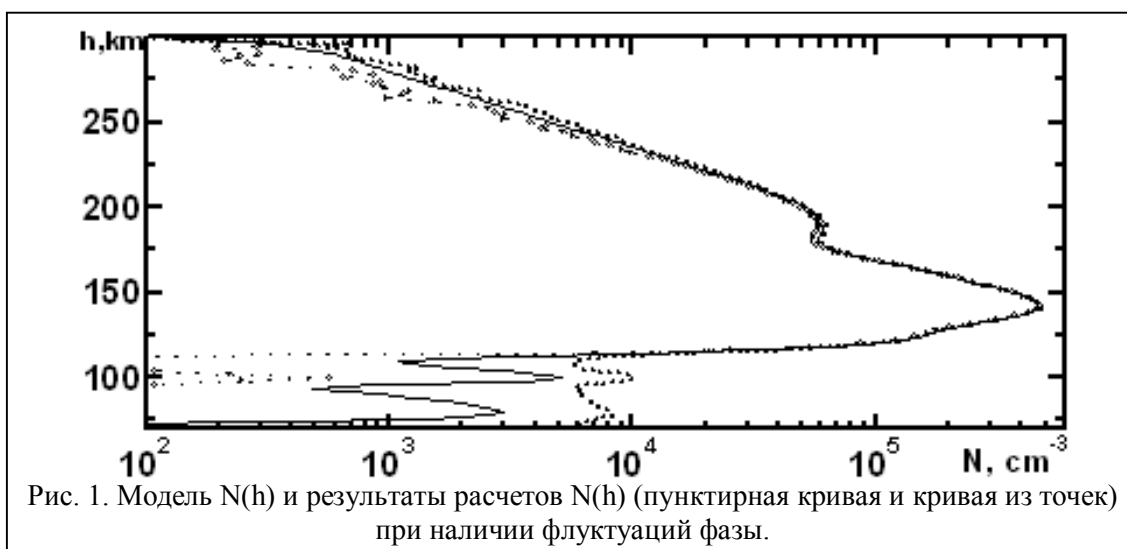


Рис. 1. Модель $N(h)$ и результаты расчетов $N(h)$ (пунктирная кривая и кривая из точек) при наличии флуктуаций фазы.

Нами разработан высокочувствительный метод [5-7], 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 [6,7]:

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

где c – скорость света, L – расстояние от спутника (КА) до перигея 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 [4,5]. По вариациям $\delta f(t)$ можно восстановить вариации частоты ДМ-сигнала $\Delta f(t)$ и вычислить прогнозируемое рефракционное ослабление ДМ-сигнала $X_{\Delta f}(t)$:

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

Тогда предлагаемая методика анализа экспериментальных данных будет следующая:

1. Формирование частоты $\Delta f(t)$ из приведенной разности частот $\delta f(t)$ позволяет исследовать только влияние плазмы и исключает влияние нейтральной атмосферы, нестабильность задающих генераторов и погрешности траекторных данных. Исключение главных источников погрешностей одночастотного радиопросвечивания на порядок увеличивает точность определения характеристик ионосферы.

2. 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 частоты зондирующего сигнала при радиопросвечивании ионосферы всегда будут однозначно связаны с рефракционным ослаблением. 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.

3. Несовпадение рефракционных ослаблений двух сигналов $X_{DM}(t)$ и $X_{CM}(t)$, если оно наблюдается при совпадении вариаций $X_{DM}(t)$ с вариациями $X_{\Delta f}(t)$, подтверждает влияние регулярных структур ионосферы. Несовпадение $X_{DM}(t)$ и $X_{CM}(t)$ обусловлено тем обстоятельством, что рефракционное ослабление ДМ-сигнала из-за влияния плазмы в 16 раз больше, чем рефракционное ослабление СМ-сигнала, и, кроме того, при сильной рефракции ДМ и СМ-сигналы проходят по разным участкам просвечиваемой ионосферы. Вариации $\Delta f(t)$ обусловлены только влиянием плазмы и если влияют регулярные структуры просвечиваемой ионосферы, то должна наблюдаться корреляция вариаций $X_{DM}(t)$ с $X_{\Delta f}(t)$. Эффекты совпадения

малых вариаций $X_{DM}(t)$ с $X_{\Delta f}(t)$ и различия вариаций $X_{DM}(t)$ и $X_{CM}(t)$ исключают влияние атмосферы и уменьшают влияние шума, т.к. для шума корреляция флуктуаций $X_{DM}(t)$ и $\Delta f(t)$ не наблюдается, потому что источники шума для $X_{DM}(t)$ и $\Delta f(t)$ разные.

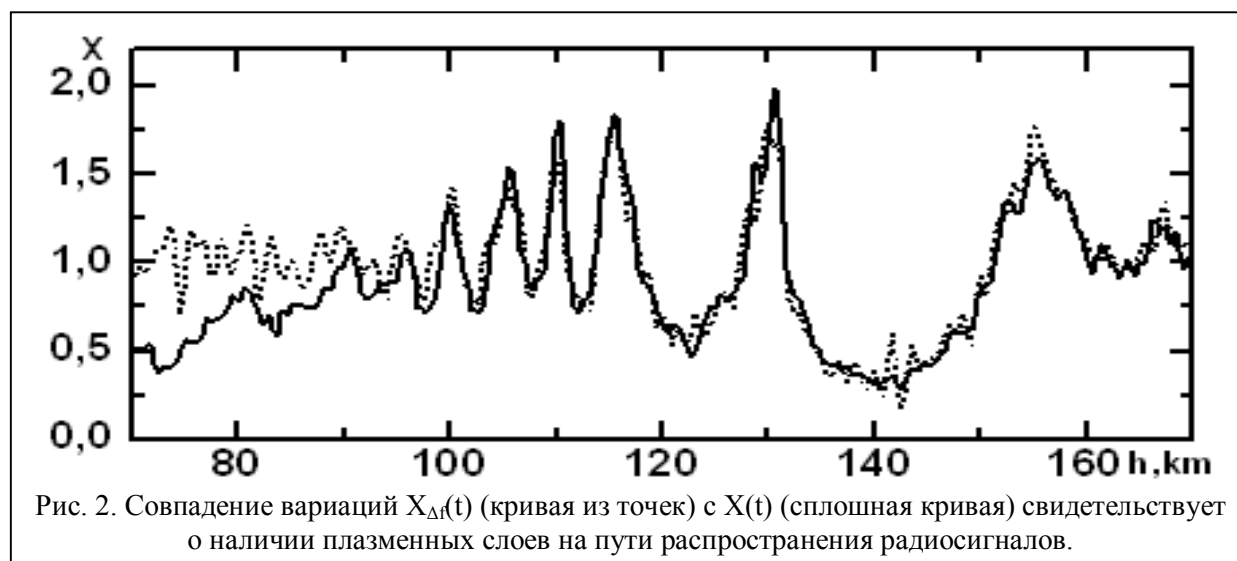
4. Совпадение рефракционных ослаблений двух сигналов $X_{DM}(t)$ и $X_{CM}(t)$, и несовпадение $X_{DM}(t)$ с $X_{\Delta f}(t)$ свидетельствует о влиянии регулярных структур нейтральной атмосферы. Это обусловлено тем обстоятельством, что рефракционное ослабление ДМ-сигнала в регулярной атмосфере не отличается от рефракционного ослабления СМ-сигнала [8], если отсутствует поглощение сигналов, а в отсутствии регулярных плазменных образований вариации $X_{DM}(t)$ и $X_{\Delta f}(t)$ становятся некоррелированными. Т.е. эффекты несовпадения малых вариаций $X_{DM}(t)$ с $X_{\Delta f}(t)$ исключают влияние плазменных слоев при исследовании верхней разреженной атмосферы.

5. Отсутствие корреляций между вариациями $X_{DM}(t)$, $X_{CM}(t)$ и $X_{\Delta f}(t)$ свидетельствует об отсутствии влияния атмосферы и ионосферы, т.е. свидетельствует о влиянии либо шума, либо неучтенных факторов.

6. Наиболее сложным является случай появления волновых процессов одновременно и в верхней атмосфере и в нижней ионосфере, когда коррелированные вариации наблюдаются одновременно на всех зависимостях $X_{DM}(t)$, $X_{CM}(t)$ и $X_{\Delta f}(t)$. В таком случае разность $X_{\Delta f}(t) - X_{DM}(t)$ будет зависеть только от влияния атмосферы и должна совпадать с $1 - X_{CM}(t)$, что и является одним из критериев разделения эффектов ионосферы и атмосферы. Из-за того, что мощность СМ-сигнала в эксперименте со станциями ВЕНЕРА-15,-16 в несколько раз меньше мощности ДМ-сигнала, шумовые флуктуации $X_{CM}(t)$ значительно превышают флуктуации $X_{DM}(t)$ и вычисление разности $X_{DM}(t) - X_{CM}(t)$ нецелесообразно, т.к. приводит к большим погрешностям.

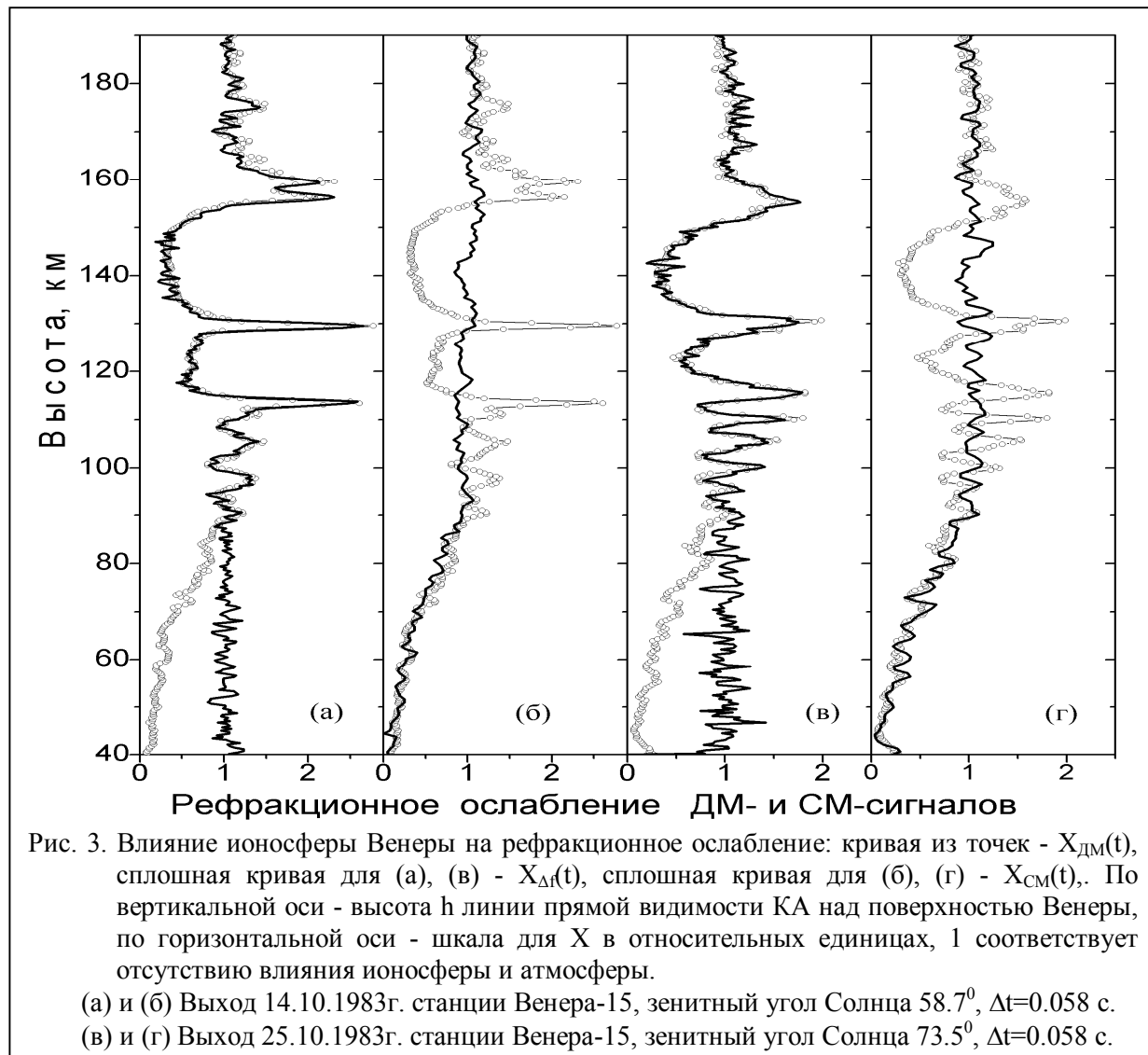
Такая методика достоверно разделяет влияние атмосферы, ионосферы и шума, что обеспечивает возможность радиовидения разреженных плазменных слоев на малых высотах и в ночной ионосфере, где влияние атмосферы, ионосферы и шума сравнимы по величине.

Данные двухчастотного радиопросвечивания ионосферы Венеры [4,9,10], полученные с помощью станций ВЕНЕРА-15,16, были обработаны с применением новых технологий. Результаты анализа подтвердили теоретические выводы и показали, что вариации рефракционного ослабления $X(t)$ сигнала 32 см при просвечивании ионосферы прямо пропорциональны вариациям градиента его частоты $f(t)$ [6,7]. Сравнение $X(t)$ с рассчитанной из частоты функцией $X_{\Delta f}(t)$ представлено на рис. 2. Полная корреляция $X_{\Delta f}(t)$ с $X(t)$ доказывает теоретические выводы, но, самое главное, указывает на существование нижней области



ионосферы на высотах 85-120 км, которую не исследовали ранее ни в одном эксперименте. Рефракционные эффекты в нижней части сравнимы с влиянием шума. 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.



На рис. 3 представлено сравнение вариаций $X_{DM}(t)$ с вариациями $X_{CM}(t)$ и $X_{\Delta f}(t)$. На рис. 3а вариации $X_{DM}(t)$ совпадают с вариациями $X_{\Delta f}(t)$ на высотах $h > 90$ км, ниже 90 км начинается нарастающее влияние атмосферы и рассогласование $X_{DM}(t)$ с $X_{\Delta f}(t)$. В области высот 155...180 км проявляется слоистая структура ионосферы, на высоте 130 км наблюдается фокусировка и увеличение мощности сигнала в 3 раза, а на высотах 90...115 км четко обнаруживаются нижние слои ионосферной плазмы. Стабильное проявление согласующихся радиоэффектов свидетельствует о том, что обнаруженные ионосферные структуры присутствуют регулярно в дневной ионосфере Венеры.

На рис. 3б вариации $X_{DM}(t)$ не коррелированы с вариациями $X_{CM}(t)$ выше 90 км, т.к. влияние плазмы на СМ-сигнал 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 $X_{DM}(t)$ и $X_{\Delta f}(t)$ 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 $X_{DM}(t)$ согласуется с вариациями $X_{CM}(t)$ при $h < 90$ км (рис. 3г), что подтверждает существование слоистых образований в атмосфере. Разделение вкладов атмосферы и ионосферы в вариации $X_{DM}(t)$ 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 $X_{DM}(t)$ аномально слабо меняется при уменьшении Δt в два раза. Возможно, что такая особенность связана с формированием периодической структуры слоев в нижней ионосфере.

Таким образом, сравнение $X_{DM}(t)$ с $X_{\Delta f}(t)$ и $X_{CM}(t)$ 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, ее параметры зависят от зенитного угла Солнца. В нижней ионосфере концентрация $N(h)$ может меняться от 10^2 до 10^4 см⁻³, но традиционные методы определения $N(h)$ приводят к ошибкам, не позволяющим получить достоверное распределение $N(h)$. Возможно, именно по этой причине станция ВЕНЕРА-ЭКСПРЕСС не выявила нижнюю дневную ионосферу в 70% сеансов [11].

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ (07-02-00514-а) и программы ОФН-16. Авторы выражают благодарность Н.А. Арманду за обсуждение полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fjeldbo G., Eshleman V.R. // Radio Sci. 1969. V. 4. № 10. P. 879.
2. Александров Ю.Н., Васильев М. Б., Вышлов А.С. и др. // РЭ. 1978. Т. 23. № 9. С. 1840.
3. Гаврик А.Л., Самознаев Л.Н. // Космические исследования. 1985. Т. 23, № 1, С. 148.
4. Савич Н.А., Андреев В.Е., Вышлов А.С. и др. // РЭ. 1986. Т. 31. № 11. С. 2113.
5. Гаврик А.Л., Павельев А.Г., Гаврик Ю.А. // Солнечно-земная физика. 2008. №12. Т. 2. С. 203-205
6. А.Л. Гаврик, Ю.А. Гаврик, Л.Н. Самознаев // РЭ. 2008. Т. 53. № 9. С. 1104.
7. Гаврик А.Л., Гаврик Ю.А., Григорьевская М.В., Копнина Т.Ф. // Труды XXII Всероссийской конференции "Распространение радиоволн (РРВ-XXII)". Ростов-на-Дону. п. Лоо. 22-26 сентября 2008. Т. 1. С. 225.
8. Яковлев О.И. Космическая радиофизика. М.: Научная книга. 1998.
9. Савич Н.А., Андреев В.Е., Вышлов А.С. и др. // РЭ. 1986. Т. 31. № 11. С. 433.
10. Савич Н.А., Андреев В.Е., Вышлов А.С. и др. // Космические исследования. 1986. Т. 24. № 3. С. 448.
11. Pätzold M. and Withers P. (2008) Europlanet N3 4th Strategic Workshop on Meteor Studies, Cologne.