

## **Исследование слоистых структур в атмосферах планет по радиозатменным данным**

В.Н. Губенко<sup>1</sup>, И.А. Кириллович<sup>1</sup>, Т.В. Губенко<sup>1</sup>, В.Е. Андреев<sup>1</sup>, Д.В. Губенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Московская область, 141190 Фрязино, пл. Введенского, дом 1, E-mail: gubenko@fireras.su, vngubenko@gmail.com.

*Определены кросс-корреляции флуктуаций амплитуды радиоволн диапазона 32 см для семи радиозатменных сеансов измерений в северной полярной атмосфере Венеры, проведенных с помощью аппаратов ВЕНЕРА-15 и -16. Значительные величины кросс-корреляции были найдены для четырех радиозатменных сеансов в высотном интервале 59.0–61.5 км. Обнаружено расслоение в верхнем ярусе облаков Венеры на высотах от 59.0 до 61.5 км, где наблюдается повышенная турбулентность атмосферы. Найдено, что время жизни мелкомасштабных слоистых неоднородностей составляет более двух суток, а их горизонтальная протяженность в меридиональном направлении может превосходить 180 км.*

*Ключевые слова: радиозатменные измерения, атмосфера Венеры мелкомасштабные слоистые неоднородности, флуктуация амплитуды радиоволн.*

## **Study of layered structures in the planetary atmospheres using radio occultation data**

V.N. Gubenko<sup>1</sup>, I.A. Kirillovich<sup>1</sup>, T.V. Gubenko<sup>1</sup>, V.E. Andreev<sup>1</sup>, D.V. Gubenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS (Fryazino branch)

*Cross-correlations of 32-cm radio wave amplitude fluctuations have been determined for seven radio occultation sessions of measurements of the Venus's northern polar atmosphere using Venera-15 and -16. Significant cross-correlations were found between 59.0 and 61.5 km in four different radio occultations. Layering has been revealed in the upper layer of the Venus clouds at altitudes of 59.0–61.5 km, which is specified by enhanced turbulence of the atmosphere. It has been found that the lifetime of the small-scale layered irregularities is 2 days or more, and their horizontal extension in the meridional direction can exceed 180 km.*

*Keywords: radio occultation measurements, Venus's atmosphere; small-scale layered irregularities, radio wave amplitude fluctuation.*

### **Введение**

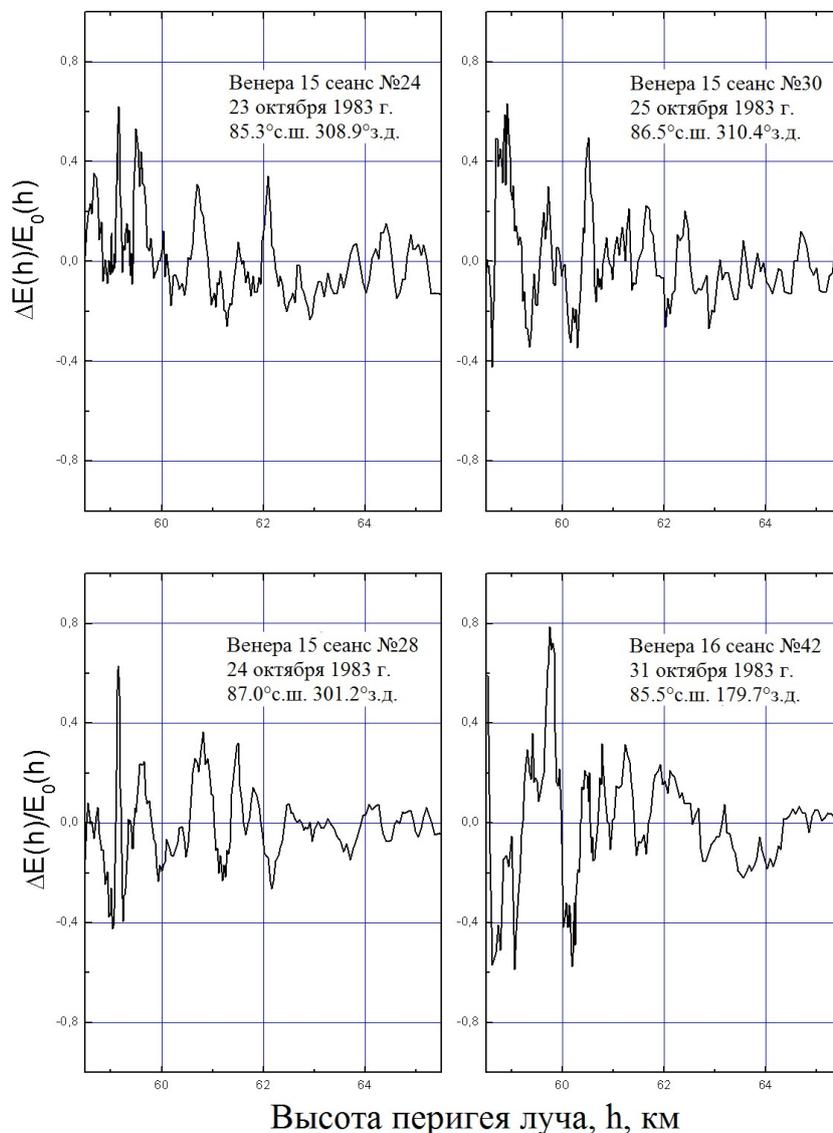
Наблюдения флуктуаций параметров радиоволн предоставляют уникальную возможность для исследования мелкомасштабных неоднородностей в атмосферах планет. Примечательной особенностью района атмосферы Венеры, расположенного на высотах вблизи 60 км, является повышенный уровень амплитудных флуктуаций, наблюдавшийся в радиозатменных экспериментах с аппаратами MARINER-5 и -10, ВЕНЕРА-9, ВЕНЕРА-15 и -16, PIONEER VENUS и MAGELLAN. Авторы работы [1] полагали, что захват внутренних гравитационных волн (ВГВ) приводит к возникновению атмосферной турбулентности, которая обуславливает амплитудные флуктуации, наблюдаемые в измерениях с аппаратом PIONEER VENUS. Другая интерпретация этих данных связана с внутренними волнами, генерируемыми конвекцией [2]. Аналогичные измерения флуктуаций интенсивности сигнала проводились в октябре 1991 года на Венере с помощью аппарата MAGELLAN. Авторы работ [3, 4] полагали, что наблюдаемые флуктуации интенсивности радиозатменных сигналов могут отражать отклик свободно распространяющихся ВГВ в атмосфере.

Заметим, что вышеупомянутые интерпретации предполагают случайный характер исследуемых флуктуаций, однако эта гипотеза нуждается в проверке. Если же флуктуации сигнала, наблюдаемые в разных радиозатменных сеансах, являются

коррелированными, то они могут быть обусловлены тонкими регулярными слоями в атмосфере планеты. Целью работы является описание и кросс-корреляционный анализ экспериментальных данных о флуктуациях амплитуды радиоволн диапазона 32 см в атмосфере Венеры. Эксперименты были выполнены в период с 16 по 31 октября 1983 года в семи северных районах атмосферы планеты на широтах более 83°.

### Экспериментальные данные и результаты кросс-корреляционного анализа

С целью поиска регулярных атмосферных структур проводился корреляционный анализ амплитудных флуктуаций, наблюдаемых в семи близко расположенных районах полярной атмосферы Венеры. На рис. 1 показаны четыре профиля нормированных флуктуаций амплитуды  $\chi(h) = \ln(E(h)/E_0(h)) \approx \Delta E(h)/E_0(h)$ , характеризующих интервал высот 58.5–65.5 км. Здесь  $E(h)$  и  $E_0(h)$  – амплитуда и средняя амплитуда сигнала;  $h$  – высота перигея радиолуча. Заметная корреляция флуктуаций проявляется на высотах 59.0–61.5 км. Амплитудные флуктуации, наблюдаемые в трех последовательных зондированиях аппаратом ВЕНЕРА-15 (сеансы 24, 28 и 30; 23, 24 и 25 октября 1983 года), демонстрируют повторяемость в деталях вблизи уровней 59.0, 59.5, 60.5 и 61.5 км.



**Рис. 1.**Высотные профили нормированных флуктуаций амплитуды в интервале 58.5–65.5 км, наблюдаемых во время зондирования четырех полярных районов атмосферы Венеры. Высотные погрешности данных обусловлены, в основном, систематическими

**ошибками и не превосходят ±0.3 км.**

Для количественного описания степени корреляции двух произвольных профилей  $\chi_1(h)$  и  $\chi_2(h)$  нами был взят нормированный коэффициент кросс-корреляции [5]:

$$b_{\chi}(1,2) = \frac{\langle \chi_1 \chi_2 \rangle - \langle \chi_1 \rangle \langle \chi_2 \rangle}{((\chi_1^2) - \langle \chi_1 \rangle^2)^{1/2} ((\chi_2^2) - \langle \chi_2 \rangle^2)^{1/2}}.$$

С этой целью, по измерениям  $\chi_1(h)$  и  $\chi_2(h)$  на интервале 59.0–61.5 км, вычислялась функция корреляции. Как правило, пик корреляции наблюдался при некотором высотном смещении, и величина пиковой корреляции бралась нами в качестве меры  $b_{\chi}(1,2)$ . Поскольку корреляционный интервал составлял всего 2.5 км, то величина пиковой корреляции, полученная в рамках смещения ±0.5 км, считалась надежной оценкой  $b_{\chi}(1,2)$ . В Таблице 1 представлены пиковые корреляции и соответствующие им смещения для разных корреляционных пар. Здесь также показаны горизонтальные разделения зондируемых районов по широте (вдоль меридиана) и по долготе (вдоль широтного круга) и временной интервал между зондированиями. Из Таблицы 1 видно, что амплитудные флуктуации, зарегистрированные в радиозатменных сеансах 24, 28 и 30, являются сильно коррелированными, а смещения пиковой корреляции для соответствующих корреляционных пар не превосходят высотной погрешности измерений, равной ±0.3 км. Значительное временное и пространственное разделение наблюдается между зондированием в сеансе 42 и остальными зондированиями, представленными в Таблице 1. Более того, пиковые смещения для корреляционных пар с участием зондирования в сеансе 42 составляют значительные доли от корреляционного интервала в 2.5 км. По этой причине мы исключили данные радиозатменного сеанса 42 при вычислении усредненного по ансамблю профиля.

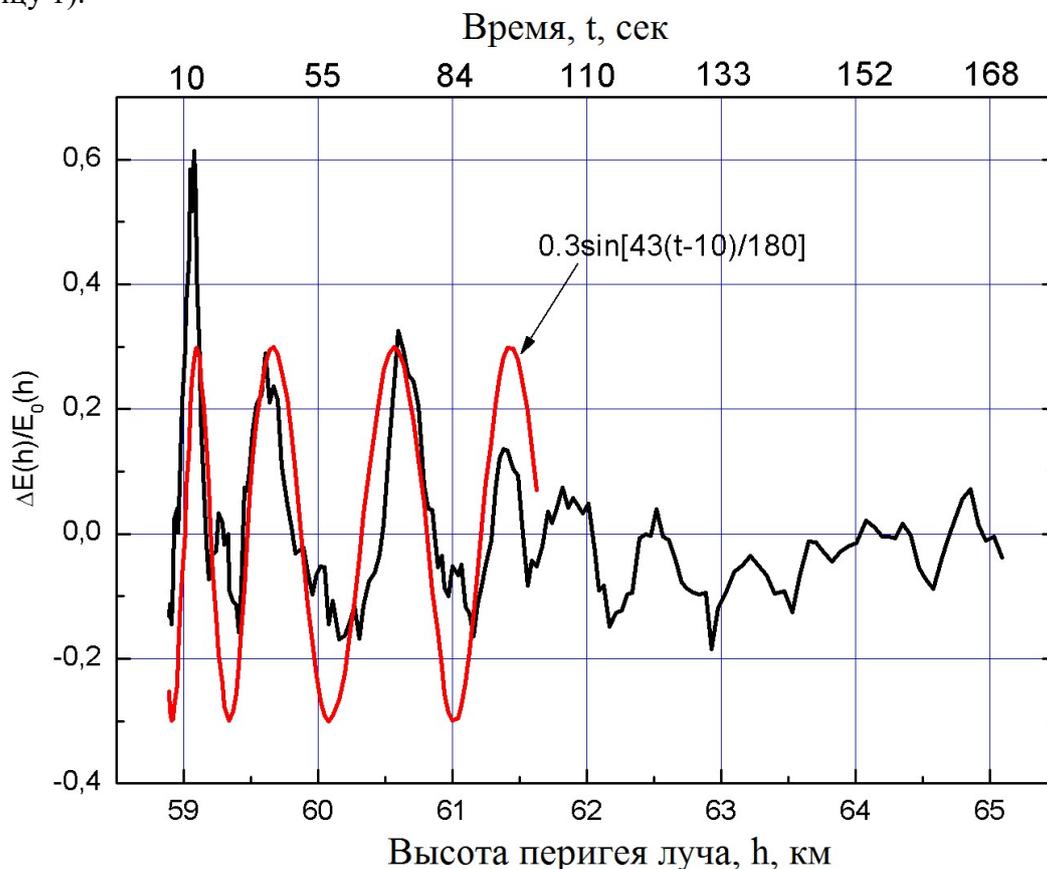
Таблица 1. Пиковые корреляции амплитудных флуктуаций для разных радиозондирований в высотном интервале 59.0 - 61.5 км полярной атмосферы Венеры

Корреляционная пара	Номера зондирований					
	24–28	24–30	24–42	28–30	28–42	30–42
Пиковая корреляция, $b_{\chi}$	0.69	0.60	0.60	0.48	0.61	0.37
Высотное смещение, км	0.18	0.27	1.10	0.10	1.00	0.80
Горизонтальное разделение зондируемых районов по широте, км	181	128	21	53	160	107
Горизонтальное разделение зондируемых районов по долготе, км	55	11	1105	56	847	972
Временной интервал между зондированиями, час	24.5	49.0	200.0	24.5	175.5	151.0

Для уменьшения влияния случайных флуктуаций три амплитудных профиля (рис. 1) были усреднены (профиль № 42 был исключен из усреднения). На рис. 2 показан средний высотный (временной) профиль амплитудных флуктуаций, характеризующий полярную атмосферу Венеры. Модельная синусоидальная функция (гладкая кривая), показанная для сравнения, была получена в результате МНК-подгонки к усредненному профилю на интервале 59.0–61.5 км. На рис. 2 можно увидеть три тонких слоя на высотах 59.0–61.5 км. Вертикальная толщина верхнего и среднего слоев составляет около 0.9 км, а толщина нижнего слоя примерно равна 0.5 км.

Таким образом, проведенный кросс-корреляционный анализ амплитудных флуктуаций указывает на присутствие тонкой регулярной структуры в верхнем ярусе облаков Венеры на высотах 59.0–61.5 км. Характерное время жизни этой структуры

превосходит 49 часов (временной интервал между измерениями). Горизонтальная протяженность обнаруженной слоистой структуры в меридиональном направлении равна 180 км, а вдоль широтного круга составляет 55 км (эти минимальные оценки представляют горизонтальные разделения зондирований по широте и долготе, см. Таблицу 1).



**Рис. 2.** Средний высотный (временной) профиль флуктуаций амплитуды сигнала диапазона 32 см в атмосфере верхнего яруса облаков Венеры. Усреднение по ансамблю проводилось по трем профилям: № 24, 28 и 30 (получены 23, 24 и 25 октября 1983 года).

### Заключение

Расслоение верхнего яруса облаков обнаружено в северной полярной атмосфере Венеры в период с 23 по 25 октября 1983 года. Об этом свидетельствует физически значимая корреляция амплитудных флуктуаций (коэффициенты корреляции  $\sim 0.5-0.7$ ), установленная для трех зондируемых районов в интервале высот 59.0–61.5 км. Найдено, что вертикальная толщина тонких регулярных слоев составляет от  $\sim 0.5$  до  $\sim 0.9$  км, их горизонтальная протяженность в меридиональном направлении превосходит  $\sim 180$  км, а время жизни мелкомасштабных слоистых неоднородностей в атмосфере составляет не менее двух суток.

*Работа выполнена в рамках государственного задания и частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект РФФИ №19-02-00083А).*

### Литература

1. Woo R., Armstrong J.W., Ishimaru A. Radio occultation measurements of turbulence in the Venus atmosphere by Pioneer Venus // J. Geophys. Res. 1980. V. 85. No. A13. P. 8031–8038.
2. Leroy S.S., Ingersoll A.P. Radio scintillations in Venus's atmosphere: Application of a theory of gravity wave generation // J. Atmos. Sci. 1996. V. 53. P. 1018–1028.
3. Hinson D.P., Jenkins J.M. Magellan radio occultation measurements of atmospheric waves

on Venus // *Icarus* 1995. V. 114. P. 310–327.

4. Gubenko V.N., Kirillovich I.A., Gubenko D.V., Andreev V.E., Gubenko T.V. Activity of Small-Scale Internal Waves in the Northern Polar Atmosphere of Venus by Radio Occultation Measurements of Signal Intensity ( $\Lambda = 32$  cm) from Venera-15 and -16 Satellites // *Solar System Research*. 2021. V. 55. No. 1. P. 1–10, doi: 10.1134/S0038094621010044.

5. Gubenko V.N., Andreev V.E., Pavelyev A.G. Detection of layering in the upper cloud layer of Venus northern polar atmosphere observed from radio occultation data // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. E03001, DOI: 10.1029/2007JE002940.