

# Зональный ветер в полярной и приполярной атмосфере Венеры по данным анализа радиозатменных измерений

Губенко В.Н., Кириллович И.А., Павельев А.Г.  
ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино, Россия  
*e-mail: vngubenko@gmail.com*

**Пятнадцатая Всероссийская открытая конференция  
“Современные проблемы дистанционного зондирования  
Земли из космоса”**

13 – 17 ноября 2017 года, ИКИ РАН, Москва, Россия



**Введение:** Имеющиеся данные свидетельствуют о зональном вращении атмосферы Венеры в западном направлении. Скорость ветра растет почти монотонно с увеличением высоты, достигая величины  $\sim 100$  м/с на уровне верхнего яруса облаков. Приближение циклострофического баланса и результаты определения вертикальных профилей плотности, температуры и давления из радиозатменных измерений “Pioneer Venus Orbiter” (PVO) были использованы для определения профилей зональной скорости ветра (Newman et al., JAS, 1984; Limaye, ASR, 1985). Предполагая симметрию тепловой структуры атмосферы в Северном и Южном полушариях Венеры, Newman et al. (1984) определили зональные скорости ветра на высотах от 40 до 80 км в интервале широт  $15^\circ$ –  $85^\circ$ . Тем не менее, авторы данной работы не исключают возможности нарушения полусферической симметрии тепловой структуры атмосферы, поскольку PVO-измерения в Южном полушарии проводились на низких широтах, а в Северном полушарии – на высоких широтах.

**Цель работы:** Определение профилей зональной скорости ветра на высотах от 50 до 80 км в высоких широтах атмосферы Венеры (отдельно для Северного и Южного полушарий планеты) по данным анализа радиозатменных измерений “Венера-15 и -16”.



**Обработка экспериментальных данных:** Для определения профилей зональной скорости ветра мы использовали приближение циклострофического баланса и радиозатменные измерения на широтах от  $60^\circ$  до  $87^\circ$  в 17 районах Южного полушария и в 27 районах Северного полушария Венеры. Эти измерения были проведены в период с октября 1983 по сентябрь 1984 года. Орбиты аппаратов “Венера-15 и -16” были такими, что заходы за планету имели место в Северном полушарии, а выходы из-за нее – в Южном. Подробная информация об исследованиях “Венера-15 и -16”, включающая время проведения сеансов и координаты районов измерений (широта, долгота, зенитный угол Солнца) приведена в работах (Yakovlev et al., *Icarus*, 1991; Gubenko et al., *Cosmic Res.*, 2001; Gubenko and Andreev, *Cosmic Res.*, 2003; Gubenko et al., *J. Geophys. Res.*, 2008). При вычислении зональной скорости ветра нами использовались высотные профили температуры и давления, полученные в результате обработки радиозатменных измерений дециметровых радиоволн ( $\lambda = 32$  см). Особенности радиозатменного метода и обработка экспериментальных данных описаны в работах (Yakovlev et al., *Icarus*, 1991; Gubenko et al., *J. Geophys. Res.*, 2008). Результатами указанной обработки являются вертикальные профили температуры и давления, которые обеспечивают значения указанных характеристик на различных высотах в интервале от 40 до 90 км (Yakovlev et al., *Icarus*, 1991). В диапазоне изменений давления, соответствующего этому высотному интервалу, мы обозначили 28 фиксированных “стандартных” уровней (узлов) давления от 1098 до 5 mb. Температура на этих уровнях давления определялась путем линейной интерполяции на основе ее экспериментальных значений вблизи выбранных узлов. Количество выбранных нами уровней давления было вполне достаточно для сохранения индивидуальных особенностей в профилях температуры. Далее, в предположении циклострофического баланса атмосферы Венеры, вычислялись вертикальные профили зональной скорости ветра.



# Базовые соотношения для вычисления зональной скорости ветра в атмосфере Венеры

Уравнение циклострофического баланса атмосферы (Leovy, JAS, 1973):

$$\frac{u^2}{a} \tan \phi = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}, \quad (1)$$

где  $u$  – зональная скорость ветра,  $\rho$  – плотность атмосферы,  $y$  – локальная декартова координата в направлении полюса,  $a$  – радиус планеты,  $p$  – давление,  $\phi$  – широта.

С учетом уравнения гидростатики и закона идеального газа соотношение (1) можно записать в виде:

$$2u \frac{\partial u}{\partial \xi} = -\frac{R}{\tan \phi} \frac{\partial T}{\partial \phi} \Big|_p, \quad (2)$$

где  $R = 191.4 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  – газовая постоянная для атмосферы Венеры;  $\xi = -\ln(p/p_0)$  – координата логарифма давления,  $p_0 = 1098 \text{ mb}$  – давление на нижней границе. Интегрируя уравнение (2) по нормали к изобарическим поверхностям имеем:

$$u_{n+1}^2 = u_n^2 - \frac{R \Delta \xi}{2 \tan \phi} \left[ \frac{\partial T}{\partial \phi_{n+1}} + \frac{\partial T}{\partial \phi_n} \right] = u_0^2 - \frac{R \Delta \xi}{2 \tan \phi} \left[ \frac{\partial T}{\partial \phi_0} + \frac{\partial T}{\partial \phi_{n+1}} + 2 \sum_{i=1}^n \frac{\partial T}{\partial \phi_i} \right], \quad (3)$$

где  $\Delta \xi = \xi_{n+1} - \xi_n = \ln(p_n/p_{n+1})$ , при этом индекс  $n$  возрастает с увеличением высоты и изменяется от значения  $n=0$  при  $p_0=1098 \text{ mb}$  (нижняя граница атмосферы) до величины  $n=27$  при давлении  $p=5 \text{ mb}$  (верхняя граница). Величины “стандартных” уровней давления были выбраны нами таким образом, что значения давления на любых соседних уровнях удовлетворяют условию:  $\Delta \xi = \ln(p_n/p_{n+1}) = 0.2$ .



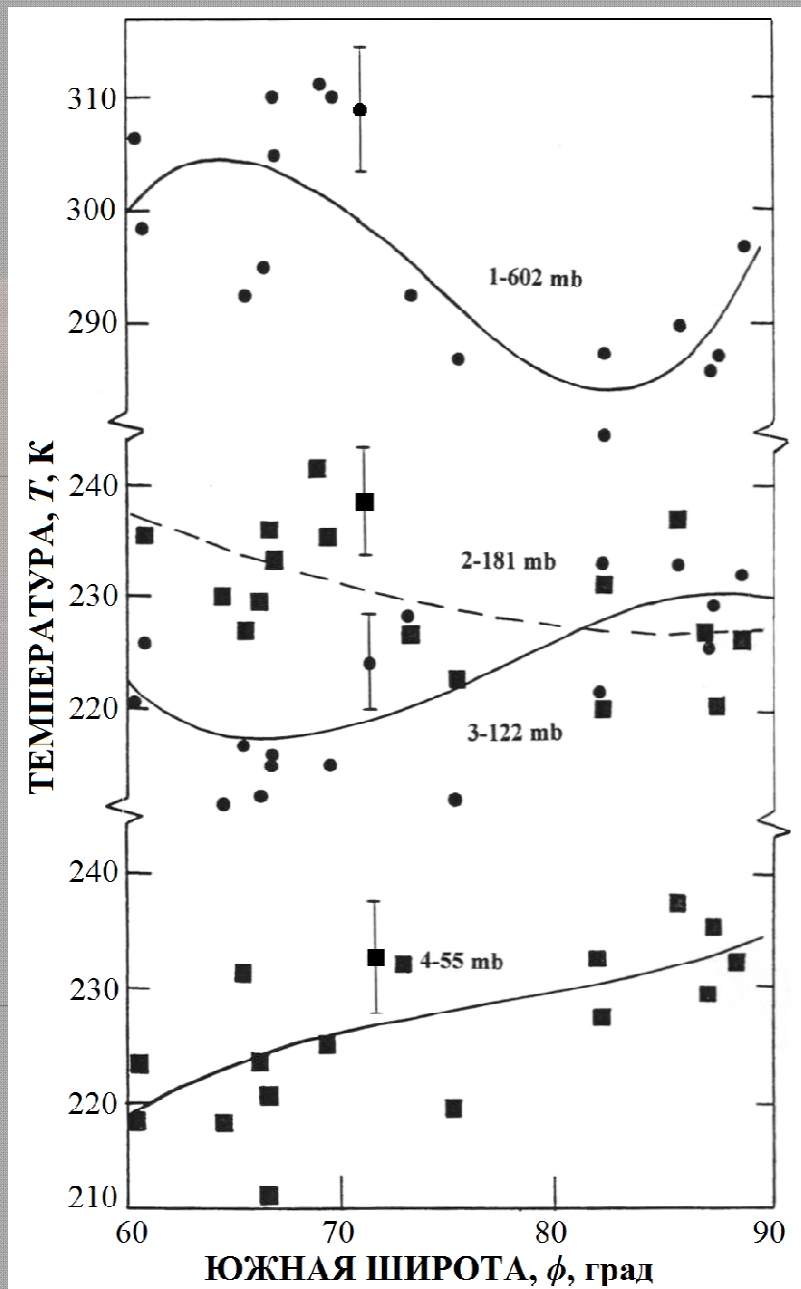
## Граничные условия

Из выражения (3) следует, что для вычисления поля зональной скорости ветра требуется, помимо знания широтных градиентов температуры, задать широтную зависимость зональной скорости ветра  $u_0(\phi)$  на нижней границе атмосферы (уровень давления  $p_0=1098$  mb). Для представления  $u_0(\phi)$  как в Северном, так и в Южном полушарии Венеры нами было выбрано следующее выражение:

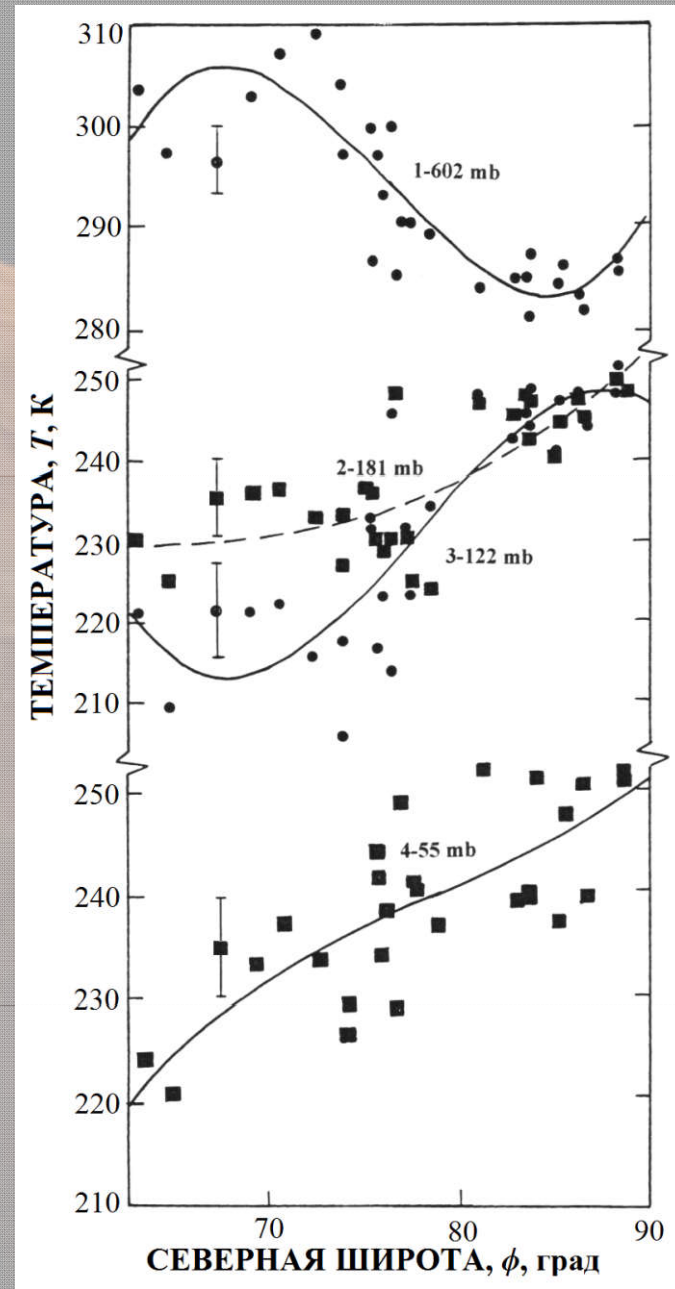
$$u_0(\phi) = 47.29 + 3.94(|\phi| - 60) - 0.37(|\phi| - 60)^2 + 6.1 \cdot 10^{-3}(|\phi| - 60)^3, \quad (4)$$

где  $\phi$  выражается в градусах, а  $u_0$  – в м/с. Этот выбор  $u_0(\phi)$  полностью соответствует результатам, приведенным на Рис. 9 в работе Newman et al. (JAS, 1984), которые были получены в Северном полушарии планеты на основе анализа радиозатменных измерений “Pioneer Venus Orbiter”.



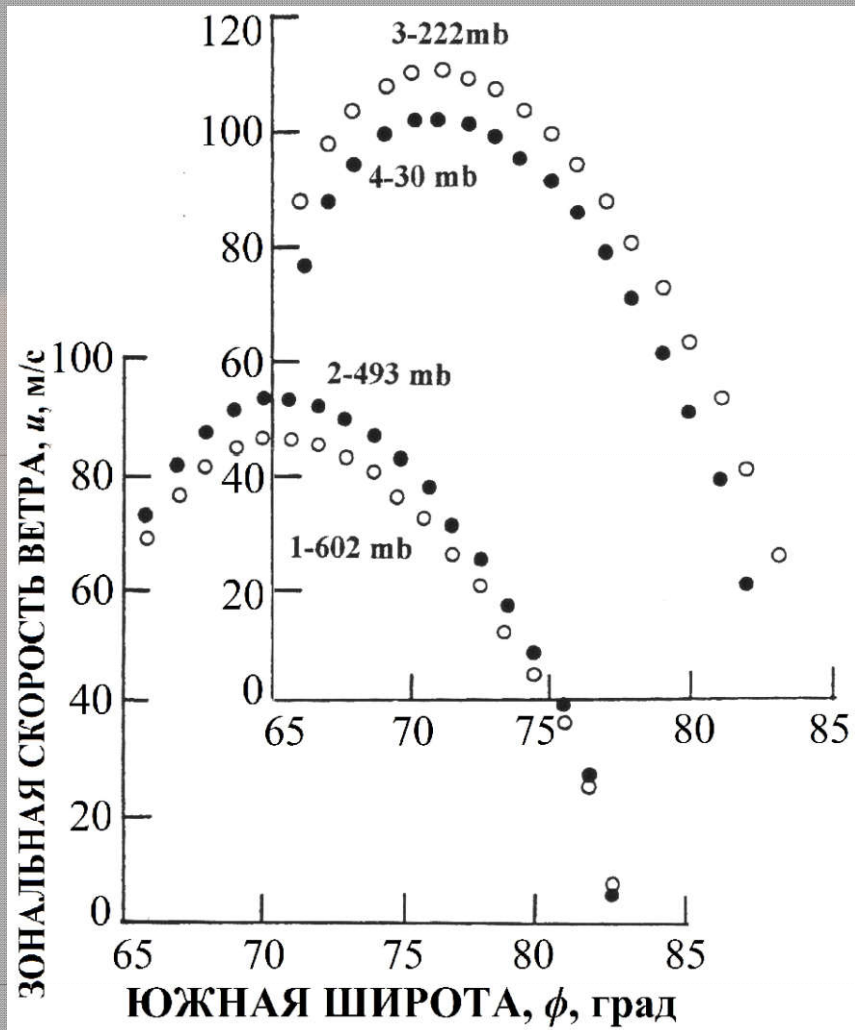


**Рис. 1.** Широтные зависимости температуры на четырех уровнях давления для Южного полушария Венеры: 1–602 mb; 2–181 mb; 3–122 mb; 4–55 mb.

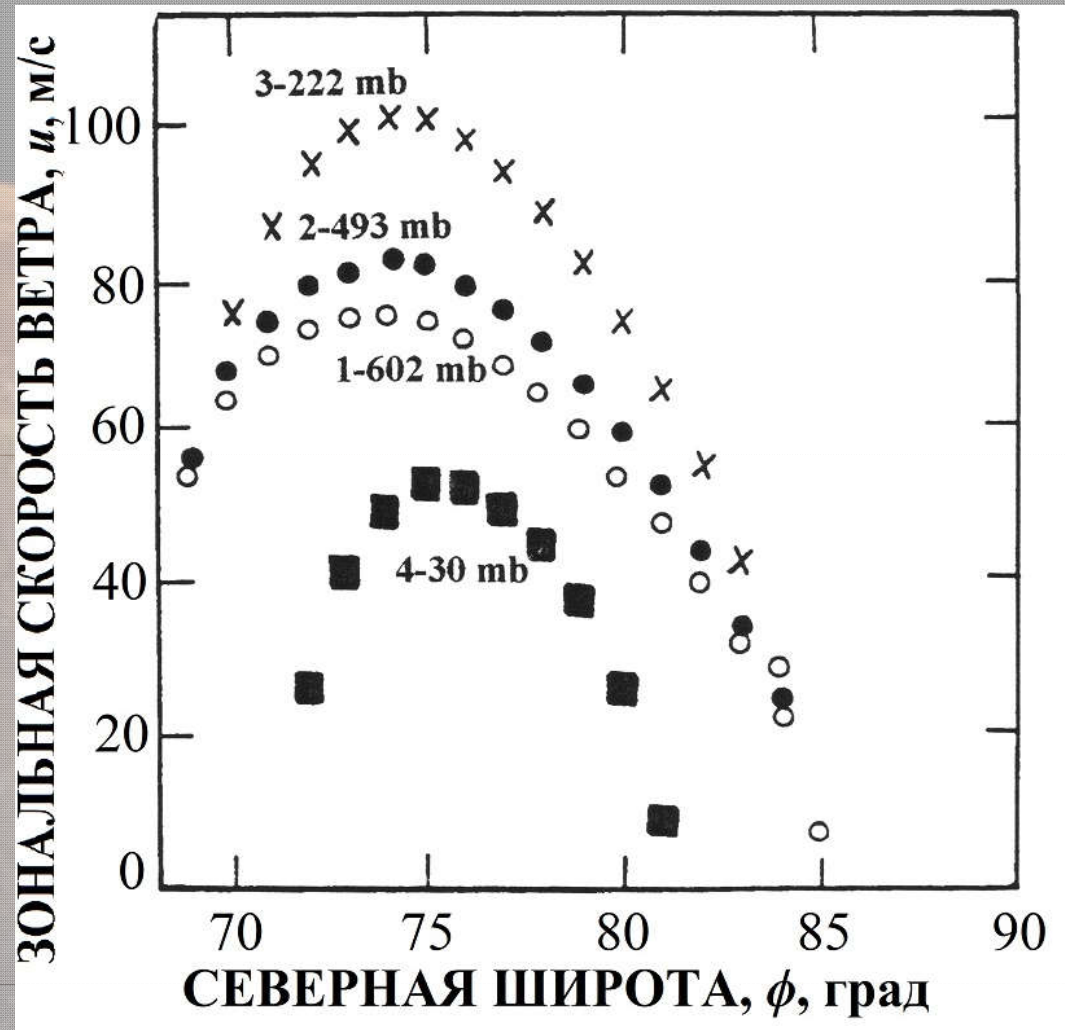


**Рис. 2.** Зависимости температуры от широты на четырех уровнях давления для Северного полушария планеты.



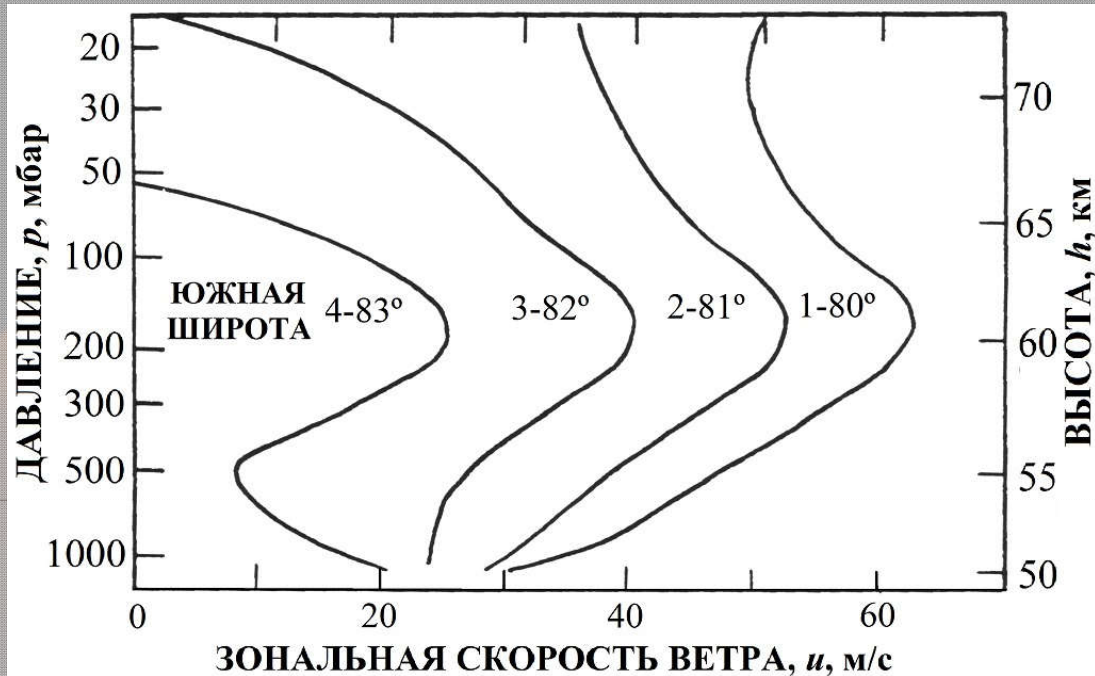


**Рис. 3.** Широтные зависимости зональной скорости ветра на четырех уровнях давления в Южном полушарии Венеры: 1–602 mb; 2–493 mb; 3–222 mb; 4–30 mb.

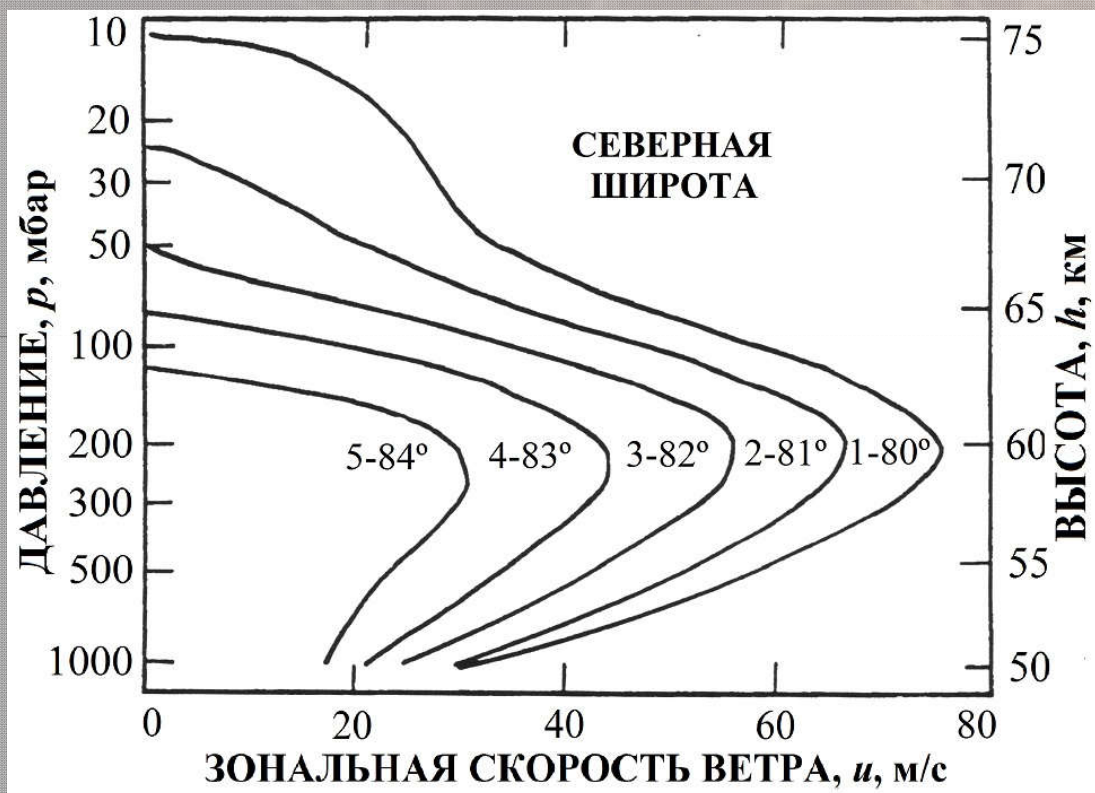


**Рис. 4.** Зависимости зональной скорости ветра от широты на четырех уровнях давления в Северном полушарии планеты.



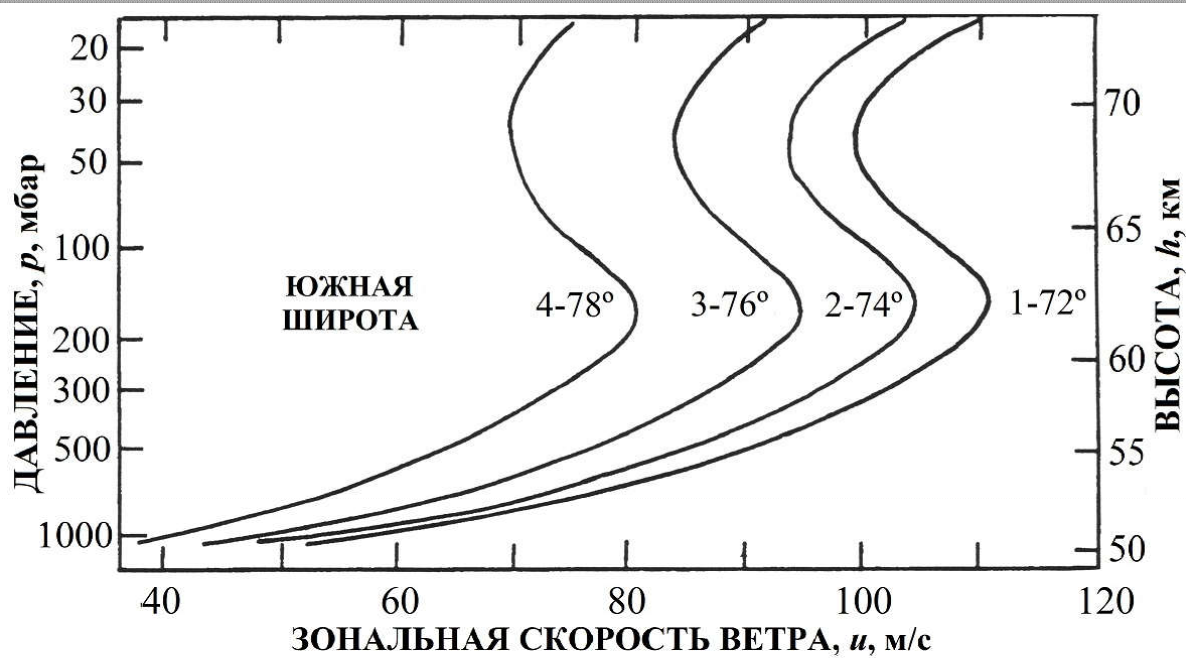


**Рис. 5.** Высотные профили зональной скорости ветра в Южной полярной атмосфере Венеры: 1–80°; 2–81°; 3–82°; 4–83°.



**Рис. 6.** Зависимости зональной скорости ветра от высоты в Северной полярной атмосфере планеты: 1–80°; 2–81°; 3–82°; 4–83°; 5–84°.





**Рис. 7.** Высотные профили зональной скорости ветра в Южной приполярной атмосфере Венеры: 1–72°; 2–74°; 3–76°; 4–78°.

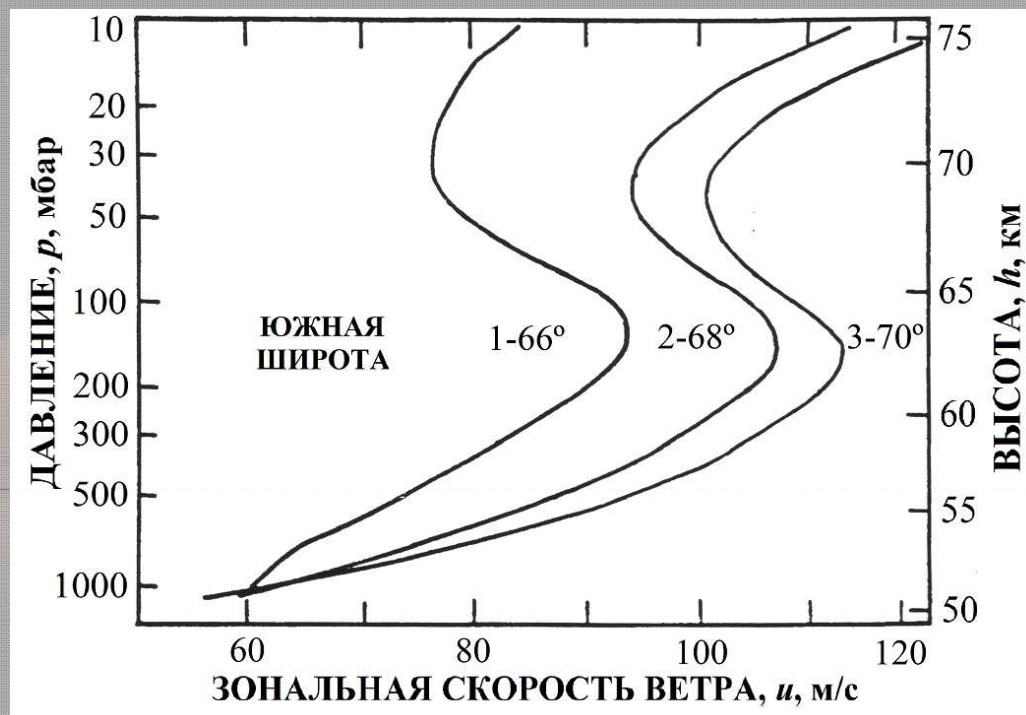
*В Южном полушарии ось струйного течения расположена на высоте около 62 км и широтах от 70° до 72°, а величина максимума зональной скорости достигает 110–115 м/с.*



**Рис. 8.** Зависимости скорости зонального ветра от высоты в Северной приполярной атмосфере планеты: 1–74°; 2–76°; 3–78°.

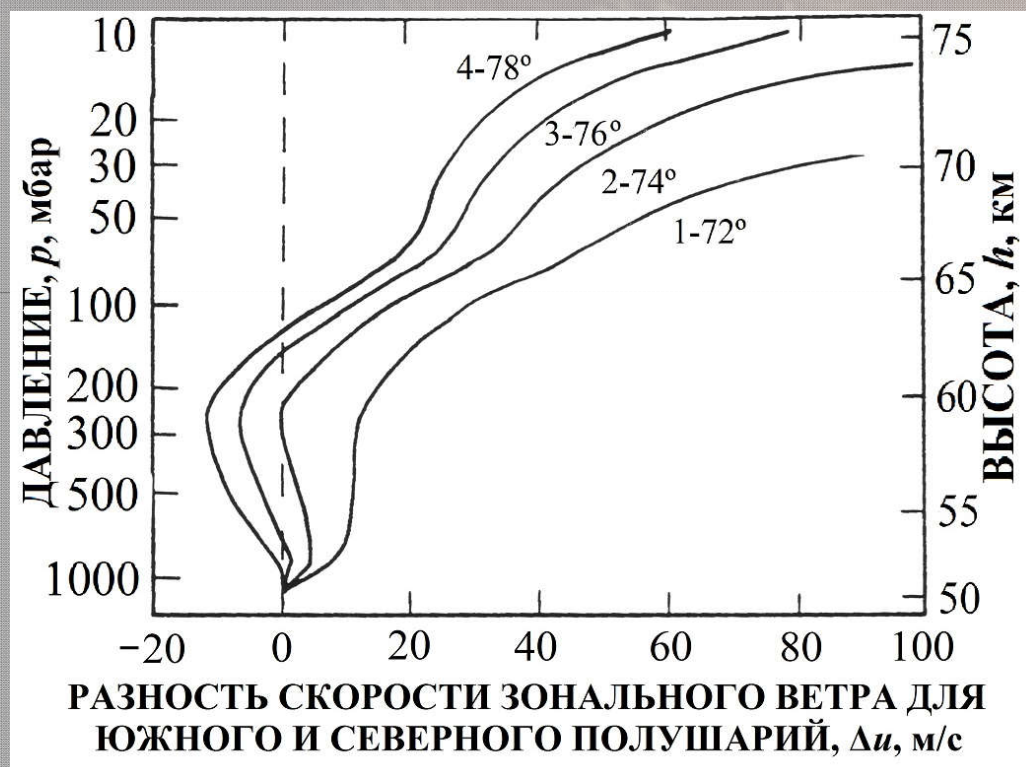
*Вблизи уровня 60 км в Северной приполярной атмосфере на широтах 73°–75° имеет место струйное течение с максимальной скоростью ~100 м/с. Наличие джетов в атмосфере Северного и Южного полушарий Венеры обусловлено отрицательным широтным градиентом температуры на высотах ниже осей струйных течений.*





**Рис. 9.** Высотные профили зональной скорости ветра в Южной приполярной атмосфере Венеры на широтах: 1–66°; 2–68°; 3–70°.

*В Южном полушарии струйное течение расположено на высоте около 62 км и широтах от 70° до 72°, а величина максимума зональной скорости достигает 110–115 м/с.*



**Рис. 10.** Разность скорости зонального ветра на уровнях одинакового давления в приполярной атмосфере Южного и Северного полушарий планеты для широт: 1–72°; 2–74°; 3–76°; 4–78°.

*Абсолютная величина разности  $\Delta u$  на уровнях давления больше 250 тв не превосходит ~10 м/с, что меньше погрешности вычисления скорости ветра, оцениваемой в ~25 м/с. Это свидетельствует о симметрии зональной циркуляции в Северном и Южном полушариях планеты на высотах ниже 59 км.*



**Заключение:** Радиозатменные данные о температуре и давлении, полученные с помощью спутников “Венера-15 и -16” в период с октября 1983 по сентябрь 1984 годов, были проанализированы нами с целью определения скорости зонального ветра в приполярных и полярных широтах атмосферы Венеры. Вычисления зональной скорости ветра проводились в приближении циклострофического баланса атмосферы планеты. Для атмосферы на высотах от 50 до 80 км, в интервале широт  $60^{\circ}$ – $85^{\circ}$  Северного и Южного полушарий Венеры, определены вертикальные профили и широтные зависимости зональной скорости ветра. Показано, что вблизи уровня 60 км в Северной приполярной атмосфере планеты на широтах  $73^{\circ}$ – $75^{\circ}$  имеет место струйное течение с максимальной скоростью  $\sim 100$  м/с. В Южном полушарии ось струйного течения расположена на высоте около 62 км и широтах от  $70^{\circ}$  до  $72^{\circ}$ , а величина максимума зональной скорости достигает  $\sim 115$  м/с. Наличие джетов обусловлено отрицательным широтным градиентом температуры в приполярной атмосфере Северного и Южного полушарий Венеры на высотах ниже осей струйных течений. Абсолютная величина разности  $\Delta u$  на уровнях давления больше 250 mb не превосходит  $\sim 10$  м/с, что меньше погрешности вычисления скорости ветра, оцениваемой в  $\sim 25$  м/с. Это свидетельствует о симметрии зональной циркуляции в Северном и Южном полушариях планеты на высотах ниже 59 км. *Данная работа была частично поддержана Программой 1.7 Президиума РАН.*



## Список литературы:

- Gubenko V.N., Yakovlev O.I., Matyugov S.S. Radio occultation measurements of the radio wave absorption and the sulfuric acid vapor content in the atmosphere of Venus // *Cosmic Res.* 2001. V. 39. No. 5. P. 439–445, doi: 10.1023/A:1012336911928.
- Gubenko V.N., Andreev V.E. Radio wave fluctuations and layered structure of the upper region of Venusian clouds from radio occultation data // *Cosmic Res.* 2003. V. 41, P. 135–140, doi: 10.1023/A:1023378829327.
- 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. No. E03001, doi: 10.1029/2007JE002940.
- Leovy, C.B. Rotation of the upper atmosphere of Venus // *J. Atmos. Sci.* 1973. V. 30, P. 1218–1220.
- Limaye S.S. Venus atmospheric circulation: observations and implications of the thermal structure // *Adv. Space Res.* 1985. V. 5. P. 51–62.
- Newman M., Schubert G., Kliore A.J., Patel I.R. Zonal winds in the middle atmosphere of Venus from Pioneer Venus radio occultation data // *J. Atmos. Sci.* 1984. V. 41. P. 1901–1913.
- Yakovlev O.I., Matyugov S.S., Gubenko V.N. Venera-15 and -16 middle atmosphere profiles from radio occultations: Polar and near-polar atmosphere of Venus // *Icarus.* 1991. V. 94. P. 493–510, doi: 10.1016/0019-1035(91)90243-M.

Спасибо за внимание!