

УДК 535.24:523.42

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОНАЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ ЮЖНОГО И СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЙ ВЕНЕРЫ ПО ДАННЫМ АНАЛИЗА РАДИОЗАТМЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СПУТНИКОВ “ВЕНЕРА-15 И -16”

В.Н. Губенко, И.А. Кириллович

*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино,
vngubenko@gmail.com.*

АННОТАЦИЯ

Вертикальные профили температуры и давления, полученные из радиозатменных измерений спутников “Венера-15 и -16”, которые были проведены в период с октября 1983 года по сентябрь 1984 года, используются для анализа скорости ветра в атмосфере Венеры. Найдены высотные и широтные зависимости зональной скорости ветра в средней атмосфере для Северного и Южного полушарий планеты на высотах от 50 до 80 км в интервале широт 60° – 85° . Зональные скорости определялись в предположении циклострофического баланса атмосферы. Установлено, что струйное течение с максимальной скоростью ~ 100 м/с, ось которого расположена вблизи уровня 60 км на широтах 73° – 75° N, реально существует в Северной приполярной атмосфере планеты. Результаты определения скорости ветра в Южном полушарии четко показывают, что струйное течение здесь расположено на высоте около 62 км в интервале широт от 70° до 72° S, а величина максимума зональной скорости достигает ~ 115 м/с. Обнаружено, что указанные джеты в высоких широтах обусловлены наличием отрицательных широтных градиентов температуры на высотах ниже осей струйных течений в приполярной атмосфере Венеры.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время, атмосферная циркуляция Венеры в областях ниже уровня верхнего яруса облаков изучена недостаточно полно. Анализ радиозатменных измерений позволяет восполнить этот пробел. Имеющиеся данные свидетельствуют о зональном вращении атмосферы Венеры в западном направлении. Скорость ветра возрастает почти монотонно с увеличением высоты, достигая значений ~ 100 м/с и более на уровне верхней границы облачного слоя. Впервые возможность определения зональной скорости ветра на основе радиозатменных измерений была показана в работе [1]. Используя данные радиопросвечивания спутников “Венера-9 и -10”, авторы работы [1] восстановили широтные профили температуры на разных уровнях высоты в атмосфере Венеры. По результатам анализа этих профилей были получены зональные скорости ветра на высотах от 60 до 70 км для трех широтных поясов Северного полушария – 35° , 58° и 68° N. Данный метод вычисления зональной скорости предполагает циклострофический баланс атмосферы на уровне верхней кромки облаков и ниже. Ранее он был предложен в работе [2], а позже успешно реализован в исследованиях [3 – 6]. Авторы указанных выше работ определили зональные скорости ветра по результатам измерений контрастов температуры и давления в местах спуска зондов “Pioneer Venus”. Вычисленные значения скорости хорошо согласуются с результатами восстановления вертикального профиля зональной скорости ветра методом дифференциальной интерферометрии с большой базой [7]. В исследованиях циркуляции [8, 9], для нахождения скорости ветра были использованы приближение циклострофического баланса атмосферы Венеры и радиозатменные профили температуры и давления, полученные с помощью аппарата “Pioneer Venus Orbiter”. Так в работе [8], зональная скорость ветра была определена на высотах от 40 до 80 км и в интервале широт 15° – 85° , в предположении симметрии тепловой структуры атмосферы Северного и Южного полушарий планеты. Авторы данной работы отметили, что анализируемые радиозатменные измерения проводились, в основном, на низких широтах ($< 65^{\circ}$ S) в Южном полушарии и на высоких широтах ($> 60^{\circ}$ N) в Северном полушарии. При этом, они не исключали возможности

нарушения полусферической симметрии тепловой структуры и циркуляции в высокоширотной атмосфере Венеры. Вертикальные профили температуры и давления, полученные на основе анализа радиозатменных измерений спутника “Venus Express” [10], также были использованы для нахождения зональных циклострофических ветров в мезосфере планеты в предположении полусферической симметрии [11]. Однако, в проведенном авторами работы [11] исследовании, отобранные ими для анализа 116 вертикальных профилей температуры полностью перекрывали все широты только в Южном полушарии, а данные в Северном полушарии были ограничены только высокими широтами.

Представляется важным установить, выполняется ли на самом деле используемое предположение о полусферической симметрии тепловой структуры и циркуляции в высокоширотной атмосфере Венеры. Для этого необходимо определить зависимости зональной скорости ветра в атмосфере Северного и Южного полушарий планеты, по отдельности. В качестве обоснования актуальности и важности данных радиозатменных исследований можно привести следующие аргументы.

I) Восстановление поля скоростей зонального ветра на высотах верхнего яруса облаков и ниже как функции координат (долготы и широты) и локального времени является важной составной частью для нахождения вертикального распределения момента количества движения, переноса импульса и источника суперротации атмосферы.

II) Аккуратные экспериментальные измерения скоростей ветра в областях со сложной турбулентной облачной структурой и волнами, позволяют количественно охарактеризовать вихревые движения, что необходимо для построения адекватных моделей глобальной циркуляции атмосферы планеты.

III) Одновременные определения зональных скоростей и других динамических характеристик, таких как температура и давление, обеспечивают более качественное понимание циклострофического баланса атмосферы Венеры, позволяют установить наличие или отсутствие атмосферных струйных течений (джетов) и изучить их устойчивость и эволюцию. Для этого важны и необходимы как прямые зондовые и баллонные измерения, так и дистанционные спутниковые (радиозатменные) исследования в атмосфере планеты.

Целью данной работы является нахождение вертикальных профилей зональной скорости на высотах от 50 до 80 км в приполярных областях Венеры на основе обработки и анализа данных радиопросвечивания спутников “Венера-15 и -16”. Для вычисления зональной скорости ветра, мы использовали приближение циклострофического баланса атмосферы и результаты радиозатменных измерений, полученных на широтах от 60° до 87° в 17 районах Южного и в 28 районах Северного полушарий Венеры. Эти измерения были проведены в период с октября 1983 года по сентябрь 1984 года. Орбиты спутников “Венера-15 и -16” были такими, что заходы за планету имели место в Северном полушарии, а выходы – в Южном. Более подробную информацию о результатах спутниковых исследований “Венера-15 и -16”, а также о времени и месте проведения радиозатменных измерений (широта, долгота, зенитный угол Солнца) можно найти в работах [12 – 15].

2. ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ИСХОДНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ “ВЕНЕРА-15 И -16”

В качестве исходных данных для определения зональной скорости ветра нами использованы высотные профили температуры и давления [12], которые были получены при обработке радиозатменных измерений “Венера-15 и -16” частоты дециметровых радиоволн ($\lambda = 32$ см). Особенности методики и обработки экспериментальных измерений подробно описаны в монографии [16]. Изменение частоты, обусловленные влиянием атмосферы, и данные о траектории движения спутника позволяют определить угол рефракции радиоволн в зависимости от прицельного расстояния [16, 17]. Использование интегрального преобразования Абеля [16 – 18] дает возможность на основе угла рефракции восстановить вертикальный

профиль коэффициента преломления радиоволн. Средний радиус Венеры a считается равным 6051 км. Учитывая газовый состав атмосферы Венеры – 96.5% CO_2 и 3.5% N_2 [19] и найденный профиль коэффициента преломления можно вычислить профиль плотности атмосферы. Интегрирование уравнения гидростатического равновесия позволяет получить зависимость давления от высоты над поверхностью планеты, а закон состояния идеального газа используется для определения температуры. При этом нами предполагалось, что значение температуры на верхней границе вычислений (интервал высот 95 – 105 км над поверхностью) равно 175 К. Различия в профилях температуры, обусловленные погрешностями задания граничной температуры, быстро уменьшаются с ростом давления и при значениях > 1 мбар (< 85 км) ими можно пренебречь. Мы полагаем, что погрешность определения температуры, связанная с флуктуациями частоты сигнала и с ошибками траекторных данных спутника, составляет ± 3 К на высотах ниже 58 км. Эмпирической оценкой погрешности температуры в измерениях может служить разброс температур на уровне давления 1 бар в интервале широт от 80° до 90°N . Было найдено, что среднеквадратичное отклонение значений характеристики составляет 2.5 К [12]. В действительности, данный разброс значений температуры может превышать реальную погрешность из-за пространственно-временной изменчивости атмосферы планеты.

Результатом описанной процедуры обработки исходных данных являются вертикальные профили температуры $T(h)$ и давления $p(h)$, которые дают значения указанных параметров на различных высотах [12]. В диапазоне изменения давления от 1098 до 5 мбар, который соответствует анализируемому интервалу высот от 50 до 80 км, мы выделили двадцать восемь фиксированных уровней давления (узлов). Температура в узловых точках определялась с помощью линейной интерполяции на основе восстановленных значений температуры в точках, ближайших к выбранным фиксированным уровням. Количество выбранных узлов обеспечивало сохранение индивидуальных особенностей температурных профилей. На рис. 1 приведены зависимости температуры T от широты ϕ , полученные в атмосфере Южного (левая панель) и Северного (правая панель) полушарий Венеры на четырех уровнях давления: 602, 181, 122 и 55 мбар. Кружками и квадратами на рисунке показаны значения температуры, относящиеся к кривым 1, 3 и к кривым 2, 4, соответственно. Гладкие кривые на рис. 1 описывают широтные зависимости температуры и являются полиномами третьей степени. Коэффициенты этих полиномов определялись на основе полиномиальной аппроксимации экспериментальных данных методом наименьших квадратов (МНК).

Для определения зональной скорости ветра в Южном полушарии Венеры нами были использованы данные о температуре и давлении, полученные при радиозондировании 17 высокоширотных районов атмосферы Южного полушария планеты [12]. Рис. 1 (левая панель) демонстрирует тенденцию изменения температуры на разных уровнях давления при изменении Южной широты. На уровне с давлением 602 мбар (кривая 1) в интервале широт от 66° до 82°S температура убывает с ростом широты. Эта тенденция характерна для широтной зависимости температуры и на более низких уровнях давления вплоть до 180 мбар. Как видно из рис. 1 (левая панель, кривые 2 и 3), в диапазоне давлений от 180 до 120 мбар, который соответствует интервалу высот от 61 до 63 км, находится переходная область, где происходит смена знака широтного градиента температуры в интервале широт от 66° до 82°S . Для переходной области характерны малые контрасты температуры между Южной полярной и приполярной атмосферой [12]. В интервале давлений от 120 до 30 мбар, который соответствует высотам 63 – 70 км в Южном полушарии, температура на уровнях постоянного давления возрастает при увеличении широты (кривая 4).

Для определения зональной скорости ветра в Северном полушарии Венеры были использованы данные о температуре и давлении, полученные при радиопросвечивании 28 районов Северного полушария, расположенных на широтах более 60°N [12]. На рис. 1 (правая панель) кривыми 1, 2, 3 и 4 представлены широтные зависимости температуры $T(\phi)$ в Северном полушарии планеты на четырех уровнях постоянного давления. Для уровня с давлением 602

мбар (правая панель, кривая 1), температура убывает с увеличением широты от 69° до 84°N . Эта тенденция сохраняется и на более низких уровнях давления вплоть до 220 мбар. В диапазоне давлений от 220 до 180 мбар, который соответствует интервалу высот от 60 до 61 км, знак широтного градиента температуры изменяется на широтах от 69° до 84°N . Здесь находится переходная область атмосферы, для которой характерны малые значения широтного градиента температуры. Эту тенденцию на верхней границе переходной области в Северном полушарии Венеры иллюстрирует кривая 2 (рис. 1, правая панель). На уровнях с давлением < 180 мбар наблюдается возрастание температуры с увеличением Северной широты (кривые 3 и 4 на рис. 1, правая панель).

При сопоставлении широтных зависимостей температуры в Северном и Южном полушариях Венеры обнаруживается, что в интервале давлений от 1100 до 220 мбар на широтах от 70° до 80° , соответствующие значения широтных градиентов температуры в Северном и Южном полушариях планеты примерно одинаковы и отрицательны. Это свидетельствует о полусферической симметрии тепловой структуры атмосферы планеты в указанном интервале давлений. Однако, эта симметрия нарушается на уровнях давления < 220 мбар, т.е. на высотах > 60 км. Высотный интервал в атмосфере, занимаемый переходной областью, для которой характерны смена знака и малые значения широтного градиента температуры, является в Северном полушарии менее протяженным и он расположен ниже, чем в Южном полушарии. На Севере переходная область занимает высотный интервал 60–61 км, а на Юге – 61–63 км. Уменьшение высоты расположения переходной области на Севере обусловлено тем, что тропопауза в Северной полярной атмосфере расположена ниже, чем в Южной полярной атмосфере [12]. Асимметрия теплового режима атмосферы в Северном и Южном полушариях планеты наблюдается и на больших высотах. Широтные градиенты температуры в атмосфере, которая расположена выше переходной области, положительны в обоих полушариях, однако их значения в Северном полушарии больше, чем в Южном. Разные значения широтных градиентов температуры обусловлены реальными контрастами температуры в атмосфере Северного и Южного полушарий Венеры. В работе [12] показано, что средняя температура “квазиизотермической” области в полярной атмосфере Южного полушария планеты примерно на 13 К ниже, чем в Северном полушарии. Поскольку контрасты температуры между приполярными областями меньше, чем между полярными областями [12], то это приводит к большим значениям широтных градиентов температуры в Северном полушарии. Следствием указанной выше асимметрии теплового режима атмосферы в Северном и Южном полушариях может быть различие в характеристиках зональной циркуляции атмосферы Венеры на уровнях выше ~ 63 км.

3. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗОНАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ВЕТРА В АТМОСФЕРЕ ВЕНЕРЫ

Рассмотрим некоторые особенности циркуляции атмосферы Венеры. Основной составляющей циркуляции атмосферы является зональное вращение атмосферы в западном направлении, при этом вся атмосфера на высотах ниже 100 км участвует в этом глобальном вращении. Атмосфера планеты, находящаяся вне экватора и расположенная в интервале высот от ~ 10 км до верхней границы облаков, пребывает в динамическом состоянии приблизительного циклострофического баланса, когда горизонтальная компонента центробежной силы, направленная к экватору, уравнивается силой меридионального градиента давления, направленной к полюсу [6]. Впервые, предположение о том, что для верхних слоев атмосферы Венеры справедливо приближение циклострофического баланса было высказано в работе [2]. Соответствующее уравнение для циклострофического баланса атмосферы планеты имеет вид:

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

где u – зональная скорость ветра, p – давление, ρ – плотность атмосферы, y – локальная

горизонтальная декартова координата в направлении полюса, ϕ – широта, a – средний радиус планеты [6]. Справедливость применения уравнения (1) для описания динамики атмосферы Венеры была доказана путем сравнения зональных циклострофических скоростей, вычисленных на основе данных зондов “Pioneer Venus” о температуре и давлении [3–6], с результатами радиоинтерферометрических измерений с большой базой [7]. В случае радиозатменного эксперимента, когда профиль $p(y)$ может быть определен, зональную скорость ветра можно найти из уравнения:

$$u^2 = \frac{g}{\tan \phi} \left(\frac{\partial z}{\partial \phi} \right)_p, \quad (2)$$

где g – ускорение свободного падения на Венере, z – вертикальная декартова координата.

Рассмотрим процедуру вычисления скорости зональных ветров, следуя работам [6, 8]. Учитывая уравнения гидростатического равновесия и состояния идеального газа, выражение (1) циклострофического баланса можно представить в виде следующего соотношения для термического ветра:

$$2u \frac{\partial u}{\partial \xi} = - \frac{R}{\tan \phi} \frac{\partial T}{\partial \phi} \Big|_p, \quad (3)$$

где $R = 191.4 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ – газовая постоянная для атмосферы Венеры, $\xi = -\ln(p/p_0)$ – координата логарифма давления, $p_0 = 1098$ мбар – давление на уровне, принятом за нижнюю границу. Для удобства вычислений целесообразно проинтегрировать уравнение (3) по нормали к изобарическим поверхностям, используя метод трапеций:

$$u_{n+1}^2 = u_n^2 - \frac{R \Delta \xi}{2 \tan \phi} \left[\frac{\partial T}{\partial \phi_{n+1}} + \frac{\partial T}{\partial \phi_n} \right], \quad (4)$$

где $\Delta \xi = \xi_{n+1} - \xi_n = \ln(p_n/p_{n+1})$, а индексы n и $(n+1)$ соответствуют соседним узловым точкам для выделенных нами фиксированных уровней давления. Значение индекса n увеличивается с ростом высоты и изменяется от 0 до 27. Значение $n = 0$ соответствует узловой точке с давлением $p_0 = 1098$ мбар (нижняя граница вычислений), а $n = 27$ – уровню с давлением 5 мбар (верхняя граница вычислений). Значения давления в двух любых соседних узлах удовлетворяют условию $\Delta \xi = \ln(p_n/p_{n+1}) = 0.2$. Из формулы (4) следует соотношение, определяющее зональную скорость ветра u на произвольном $(n+1)$ уровне давления для заданной широты ϕ [20]:

$$u_{n+1}^2 = u_0^2 - \frac{R \Delta \xi}{2 \tan \phi} \left[\frac{\partial T}{\partial \phi_0} + \frac{\partial T}{\partial \phi_{n+1}} + 2 \sum_{i=1}^n \frac{\partial T}{\partial \phi_i} \right]. \quad (5)$$

Из выражения (5) следует, что для вычисления поля скоростей ветра необходимо знание широтных градиентов температуры и зависимости зональной скорости ветра от широты $u_0(\phi)$ на граничном уровне с давлением $p_0 = 1098$ мбар. В качестве такой функции $u_0(\phi)$ для Северного и Южного полушарий Венеры была выбрана следующая зависимость:

$$u_0(\phi) = 47.29 + 3.94(|\phi| - 60) - 0.37(|\phi| - 60)^2 + 6.1 \cdot 10^{-3}(|\phi| - 60)^3, \quad (6)$$

где ϕ выражено в градусах, u_0 – в м/с. Выбор $u_0(\phi)$ для Северного полушария планеты соответствует результатам, приведенным на рис. 9 в работе [8]. Использование такой же функции $u_0(\phi)$ для Южного полушария Венеры предполагает полусферическую симметрию зональной циркуляции на уровне с давлением $p_0 = 1098$ мбар. Свидетельством в пользу данного предположения является полусферическая симметрия тепловой структуры атмосферы на уровнях с давлением более 220 мбар [12], которая обсуждалась выше.

4. ЗОНАЛЬНЫЕ ВЕТРЫ В АТМОСФЕРЕ ЮЖНОГО И СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЙ ВЕНЕРЫ

Предшествующие наблюдения циркуляции атмосферы Венеры выявили в интервале средних широт (50° – 55° N) мощные струйные течения с максимумами зональной скорости, изменяющимся от ~ 110 м/с [21] до ~ 140 м/с [8]. При анализе измерений радиопросвечивания, проведенных с помощью спутников “Венера-15 и -16” [20, 22], в высоких широтах ($> 70^{\circ}$) Северного и Южного полушарий планеты также были обнаружены джеты с максимумами скорости от ~ 100 до ~ 115 м/с. Высокоширотное струйное течение с максимумом скорости ~ 95 м/с, ось которого расположена на высоте ~ 60 км и широте 70° N, ранее было выявлено в атмосфере Северного полушария по радиозатменным данным “Pioneer Venus” [8].

Рис. 2 демонстрирует вертикальные профили зональной скорости ветра в приполярной атмосфере Южного (левая панель) и Северного (правая панель) полушарий Венеры на трех широтных уровнях. Шкалы давлений и высот приведены по осям ординат слева и справа, соответственно. Зональная скорость ветра в интервале широт от 60° до 90° определялась нами с помощью соотношения (5), учитывая граничное условие (6) и данные о широтных градиентах температуры в атмосфере Южного и Северного полушарий планеты. Общей особенностью вертикальных профилей скорости ветра в Южных широтах является возрастание скорости с увеличением высоты от 50 до 62 км. На высоте около 62 км, которой соответствует давление ~ 149 мбар, зональная скорость ветра достигает своих локальных максимумов (рис. 2, левая панель): 114 м/с на широте 70° S, 106 м/с на широте 68° S и 94 м/с на широте 66° S. На рис. 3 представлены зависимости зональной скорости ветра от высоты в Южной приполярной атмосфере Венеры на широтах: 1– 72° S; 2– 74° S; 3– 76° S; 4– 78° S. Результаты определения скорости ветра в Южном полушарии планеты четко показывают (см. рис. 2 и 3), что струйное течение здесь расположено на высоте ~ 62.5 км в интервале широт от 70° до 72° S, а величина максимума зональной скорости достигает ~ 115 м/с.

На рис. 2 (правая панель) представлены вертикальные профили зональной скорости ветра в приполярной атмосфере Северного полушария на широтах 74° , 76° и 78° N. Здесь возрастание скорости ветра при увеличении высоты наблюдается в интервале от 50 до 60 км. Зональная скорость ветра в приполярной атмосфере Северного полушария достигает своих локальных максимумов на высоте ~ 60 км (давление ~ 220 мбар), которые составляют 102 м/с на широте 74° N, 100 м/с на широте 76° N и 90 м/с на широте 78° N. Из зависимостей, представленных на рис. 2 (правая панель) следует, что скорость ветра быстро убывает с увеличением высоты на уровнях > 60 км и практически равна нулю на высоте ~ 75 км, что характерно для высокоширотной атмосферы Северного полушария Венеры.

Рис. 4 демонстрирует вертикальные профили зональной скорости ветра в полярной атмосфере Южного (левая панель) и Северного (правая панель) полушарий планеты на разных широтных уровнях. Кривые 1, 2, 3 и 4 на рис. 4 (левая панель) описывают высотные профили скорости ветра в Южном полушарии на широтах 80° , 81° , 82° и 83° S, соответственно. В интервале широт от 80° до 82° S, при увеличении высоты от 50 до ~ 61 км скорость ветра возрастает. Максимумы скорости ветра достигаются на высоте 60.5 км и равны: 63 м/с на широте 80° S, 53 м/с на широте 81° S и 40 м/с на широте 82° S. Высотный профиль скорости ветра на широте 83° S отличается от профилей на более низких широтах. Здесь наблюдаются: локальный минимум скорости ветра на высоте ~ 55 км и ее локальный максимум ~ 25 м/с на высоте ~ 60.5 км. При дальнейшем увеличении высоты скорость ветра быстро уменьшается. Проведенный нами анализ показал, что применение уравнения циклострофического баланса (5) к имеющимся экспериментальным данным на широтах $\phi > 83^{\circ}$ S некорректно, поскольку вычисляемые значения квадрата скорости ветра становятся отрицательными.

Кривые 1, 2, 3, 4 и 5 на рис. 4 (правая панель) описывают высотные профили зональной скорости ветра в Северном полушарии Венеры на широтах 80° ; 81° ; 82° ; 83° и 84° N,

соответственно. В интервале широт от 80° до 84°N , скорость ветра возрастает при увеличении высоты от 50 до ~ 60 км и быстро уменьшается на более высоких уровнях. Максимумы зональной скорости наблюдаются на высоте 59.5 км и составляют: 76 м/с на широте 80°N , 67 м/с на широте 81°N , 56 м/с на широте 82°N и 44 м/с на широте 83°N . На широте 84°N , максимум скорости ветра равен 31 м/с и он расположен несколько ниже (58.5 км).

Кратко рассмотрим погрешности определения зональной скорости ветра. Разброс данных о температуре, обусловленный пространственно-временными вариациями состояния атмосферы, приводит к погрешностям определения широтных градиентов температуры и, следовательно, к ошибкам при определении скорости ветра. Вторым источником погрешностей могут являться граничные условия для зональной скорости ветра, которые являются а priori неизвестными. Мы полагаем, что ошибка в задании скорости ветра на уровне нижней границы $p_0=1098$ мбар не превышает ± 10 м/с. С учетом экспериментальных ошибок определения широтных градиентов температуры, погрешность наших вычислений зональной скорости ветра на оси струйного течения составляет примерно ± 25 м/с, что близко к оценке погрешностей скорости ветра, полученной в работе [8].

Широтные зависимости зональной скорости ветра для Южного (левая панель) и Северного (правая панель) полушарий Венеры на четырех уровнях давления: 1–602 мбар; 2–493 мбар; 3–222 мбар; 4–30 мбар приведены на рис. 5. Из рисунка видно, что на всех четырех уровнях давления в зависимостях скорости ветра от широты в Южном полушарии имеют место максимумы на широтах 70° – 72°S . Это указывает на существование в этом интервале широт Южного полушария струйного течения с максимальной скоростью ~ 115 м/с, ось которого проходит на высоте около 62 км. Струйное течение обусловлено отрицательным широтным градиентом температуры, существующим ниже его оси на высотах от 50 до 62 км, который и приводит к положительному вертикальному сдвигу скорости ветра в нижней части потока.

Зависимости зональной скорости ветра, показанные на рис. 5 (правая панель) кривыми 1, 2 и 3, демонстрируют максимумы скорости на широтах 73° – 75°N , а положение максимума на кривой 4 смещено на $\sim 1.5^\circ$ в сторону более высоких широт. Таким образом, представленные зависимости показывают, что в интервале широт 73° – 75°N Северного полушария имеет место струйное течение с максимальной скоростью ветра ~ 100 м/с, ось которого расположена на высоте ~ 60 км. Его существование обусловлено отрицательным широтным градиентом температуры в приполярной атмосфере Венеры на высотах ниже оси струйного течения.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравним полученные нами результаты с имеющимися сведениями о зональных ветрах на широтах более 60°N в Северном полушарии Венеры. Сопоставление с результатами работы [8] представляет особый интерес, поскольку в обоих случаях были использованы сходные методики определения скорости ветра, что позволяет получить данные об изменчивости зональной циркуляции атмосферы в высоких северных широтах за период около пяти лет, разделяющий радиозатменные измерения “Pioneer Venus” и “Венера-15 и -16”. Сравнение результатов показывает, что на широтах $\phi > 60^\circ\text{N}$ в Северном полушарии планеты наблюдается повторяемость некоторых особенностей зональной циркуляции атмосферы. В первую очередь, это относится к струйному течению с максимумом скорости ~ 95 м/с, ось которого расположена на высоте ~ 61 км и широте $\sim 70^\circ\text{N}$ [8]. При сравнении наших результатов с данными работы [8] обнаруживается незначительное изменение положения оси струйного течения на $\sim 4^\circ$ по широте и ~ 1 км по вертикали. Мы полагаем, что указанный сдвиг ~ 1 км по вертикали связан с ошибками высотной привязки результатов измерений, а смещение по широте может быть обусловлено следующими двумя факторами. Во-первых, это временные вариации атмосферной циркуляции. Во-вторых, определяя зональную скорость ветра, авторы работы [8] использовали всю совокупность данных о температуре без разделения ее на части в Северном и Южном полушариях Венеры. Последнее обстоятельство может существенно исказить широтные

зависимости температуры на уровнях давления близких к оси струйного течения и вносить дополнительные погрешности в результаты вычислений. Учесть вклад указанных факторов на результаты определения положения струйного течения не представляется возможным. Однако, если положение оси высокоширотного струйного течения действительно изменяется по широте с течением времени, то это может представлять интерес при исследовании динамических процессов в атмосфере Венеры.

Сопоставим профили зональной скорости ветра в Северном и Южном полушариях планеты. Измерения с помощью спутников “Венера-15 и -16” проводились в течение 11 месяцев, поэтому влиянием долговременных вариаций состояния атмосферы с большими периодами можно пренебречь. На рис. 6 кривыми 1, 2, 3 и 4 показаны профили разности зональной скорости в Южном и Северном полушариях Венеры Δu на уровнях одинакового давления для четырех широтных диапазонов: 72° , 74° , 76° и 78° , соответственно. По оси ординат справа на рисунке приведены соответствующие высоты. Из рассмотрения представленных профилей следует, что модуль разности зональной скорости Δu на уровнях с давлением > 250 мбар не превышает величину 10 м/с и оказывается меньше погрешности определения скорости, оцениваемой нами в 25 м/с. Это указывает на полусферическую симметрию зональной циркуляции приполярной атмосферы в Северном и Южном полушариях планеты на высотах < 59 км. Зональные скорости в Южном полушарии больше, чем в Северном на уровнях выше 63 км. Данный факт объясняется тем, что температура в высокоширотной атмосфере разных полушарий несколько отличается на указанных высотах. Полярное потепление более явно выражено в Северном полушарии [12], что приводит к большим положительным значениям широтных градиентов температуры на высотах > 63 км и вызывает более быстрое уменьшение скорости ветра с ростом высоты в Северном полушарии по сравнению с Южным. По этой причине, в Северном полушарии зональная составляющая скорости ветра практически полностью подавляется на высоте ~ 75 км в приполярной атмосфере и на высоте ~ 63 км в полярной. В атмосфере Южного полушария такого подавления зональной циркуляции на указанных высотах не наблюдается.

Анализ имеющихся данных о циркуляции атмосферы в высоких широтах Северного полушария планеты свидетельствует о стабильности зональных ветров на высотах ниже 59 км на временном интервале около пяти лет. Выше этого уровня имеет место струйное течение, в котором максимальная скорость по нашим данным и данным работы [8] почти не меняется и составляет 95–100 м/с. Высота оси струйного течения остается практически постоянной, а широта, на которой достигается максимальная скорость ветра, варьируется по данным разных измерений от 70° до 74°N . Характерной особенностью состояния атмосферы в высоких широтах Северного полушария является подавление зональной циркуляции на высоте ~ 75 км в приполярной и на более низких высотах в полярной атмосфере. Сравнение результатов определения зональной скорости ветра в Северном и Южном полушариях указывает на симметрию атмосферной циркуляции относительно экваториальной плоскости на высотах ниже ~ 60 км. Выше этого уровня в приполярной атмосфере обоих полушарий имеют место струйные течения с примерно одинаковым расположением осей по высоте и по широте. Максимальные значения скорости ветра в течениях отличаются не более чем на 10%. Выше ~ 63 км происходит нарушение полусферической симметрии зональной циркуляции, обусловленное возрастанием скорости ветра на больших высотах в Южном полушарии, и наоборот, подавлением зональной циркуляции атмосферы в Северном полушарии Венеры.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Программы № 28 Президиума Российской академии наук.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чуб Е.В., Яковлев О.И. Температура и зональная циркуляция атмосферы Венеры по данным экспериментов радиопросвечивания // Космич. исслед. 1980. Т. 18. № 3. С. 435–441.
2. Leovy C.B. Rotation of the upper atmosphere of Venus // J. Atmos. Sci. 1973. V. 30. № 6.

- P. 1218–1220. doi: 10.1175/1520-0469(1973)030.
3. *Seiff A., Kirk D.B., Young R.E. et al.* Measurements of thermal structure and thermal contrasts in the atmosphere of Venus and related dynamical observations: Results from the four Pioneer Venus probes // *J. Geophys. Res.* 1980. V. 85, № A13. P. 7903–7933.
 4. *Schubert G., Covey C., Del Genio et al.* Structure and circulation of the Venus atmosphere // *J. Geophys. Res.* 1980. V. 85, № A13. P. 8007–8025.
 5. *Seiff A.* Dynamical implications of the observed thermal contrasts in Venus upper atmosphere // *Icarus.* 1982. V. 51, № 3. P. 574–592.
 6. *Schubert G.* General circulation and dynamical state of the Venus atmosphere // *Venus / Eds: Hunten D.M., Colin L., Donahue T.M., Moroz V.I.* University of Arizona Press. Tucson, 1983. P. 681–765.
 7. *Counselman III C.C., Gourevitch S.A., King R.W et al.* Zonal and meridional circulation of the lower atmosphere of Venus determined by radio interferometry // *J. Geophys. Res.* 1980. V. 85, № A13. P. 8026–8030.
 8. *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, № 12. P. 1901–1913.
 9. *Limaye S.S.* Venus atmospheric circulation: Observations and implications of the thermal structure // *Adv. Space Res.* 1985. V. 5, № 9. P. 51–62.
 10. *Tellmann S., Pätzold M., Häusler B. et al.* Structure of the Venus neutral atmosphere as observed by the Radio Science experiment VeRa on Venus Express // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114, № E00B36. P. 354–372. doi: 10.1029/2008JE003204.
 11. *Piccialli A., Tellmann S., Titov D.V. et al.* Dynamical properties of the Venus mesosphere from the radio-occultation experiment VeRa onboard Venus Express // *Icarus.* 2012. V. 217. P. 669–681. doi: 10.1016/j.icarus.2011.07.016.
 12. *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, № 2. P. 493–510. doi: 10.1016/0019-1035(91)90243-M.
 13. *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, № 5. P. 439–445. doi: 10.1023/A:1012336911928.
 14. *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, № 2. P. 135–140. doi: 10.1023/A:1023378829327.
 15. *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.
 16. *Яковлев О.И.* Распространение радиоволн в космосе. М.: Наука, 1985.
 17. *Kliore A.* Mathematics of profile inversion // *NASA TMX-62 / Ed: L. Colin.* Washington, 1972.
 18. *Fjelbdo G., Eshelman V.R.* The atmosphere of Mars analyzed by integral inversion of the Mariner-4 occultation data // *Planetary and Space Sci.* 1968. V. 16, № 8. P. 1035–1054.
 19. *Hoffman J.H., Oyama V.I., Zahn U.* Measurements of Venus lower atmosphere composition: A comparison of results // *J. Geophys. Res.* 1980. V. 85, № A13. P. 7871–7881.
 20. *Губенко В.Н., Матюгов С.С., Яковлев О.И., Ваганов И.Р.* Зональный ветер в южных полярных областях Венеры по данным радиопросвечивания // *Космич. исслед.* 1992. Т. 30, № 3. С. 390–395.
 21. *Zasova L.V., Linkin V.M., Khatuntsev I.V.* Zonal wind in the middle atmosphere of Venus // *Cosmic Res.* 2000. V. 38. P. 49–65.
 22. *Ваганов И.Р., Яковлев О.И., Матюгов С.С., Губенко В.Н.* Ветер в северной полярной атмосфере Венеры // *Космич. исслед.* 1992. Т. 30, № 5. С. 695–699.

**INVESTIGATION OF ZONAL CIRCULATION OF THE VENUS'S ATMOSPHERE AT
HIGH LATITUDES OF THE SOUTHERN AND NORTHERN HEMISPHERES
ACCORDING TO AN ANALYSIS OF RADIO OCCULTATION MEASUREMENTS OF
THE "VENERA-15 AND -16" SATELLITES**

Vladimir N. Gubenko, Ivan A. Kirillovich

*Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS, Fryazino,
vngubenko@gmail.com.*

ABSTRACT

Vertical temperature and pressure profiles obtained from the "Venera-15 and -16" spacecraft radio occultation measurements made from October 1983 to September 1984 are used for a wind speed analysis in the atmosphere of Venus. The altitude and latitude profiles of a zonal wind speed in the middle atmosphere for Northern and Southern hemispheres of planet at altitudes from 50 to 80 km and in the latitude interval from 60° to 85° have been found. Zonal speeds were determined assuming cyclostrophic balance of the atmosphere. The jet flow with a maximum speed ~100 m/s and the jet axis located at an altitude of 60 km and latitudes 73°–75°N is shown to exist really in the Northern near-polar atmosphere. The wind speed determination results in the Southern hemisphere show clearly the presence of the jet with a maximum speed ~115 m/s located at an altitude of 62 km and latitudes 70°–72°S. It was found that indicated high-latitude jets are due to by the negative latitude-temperature gradients at altitudes below jet flow axes in the near-polar atmosphere of Venus.

Подписи к рисункам статьи: В.Н. Губенко, И.А. Кириллович

«Исследование зональной циркуляции атмосферы в высоких широтах Южного и Северного полушарий Венеры по данным анализа радиозатменных измерений спутников "Венера-15 и -16"»

Рис. 1. Широтные зависимости температуры для Южного (левая панель) и Северного (правая панель) полушарий Венеры на четырех уровнях давления: 1–602 мбар; 2–181 мбар; 3–122 мбар; 4–55 мбар.

Рис. 2. Вертикальные профили зональной скорости ветра в приполярной атмосфере Южного (левая панель) и Северного (правая панель) полушарий планеты на трех широтных уровнях.

Рис. 3. Зависимости зональной скорости ветра от высоты в Южной приполярной атмосфере Венеры на широтах: 1–72°S; 2–74°S; 3–76°S; 4–78°S.

Рис. 4. Вертикальные профили зональной скорости ветра в полярной атмосфере Южного (левая панель) и Северного (правая панель) полушарий планеты на разных широтных уровнях.

Рис. 5. Широтные зависимости зональной скорости ветра для Южного (левая панель) и Северного (правая панель) полушарий Венеры на четырех уровнях давления: 1–602 мбар; 2–493 мбар; 3–222 мбар; 4–30 мбар.

Рис. 6. Профили разности скорости зонального ветра в приполярной атмосфере Южного и Северного полушарий планеты на уровнях одинакового давления для четырех широтных диапазонов: 1–72°; 2–74°; 3–76°; 4–78°.

Статья: В.Н. Губенко, И.А. Кириллович

«Исследование зональной циркуляции атмосферы в высоких широтах Южного и Северного полушарий Венеры по данным анализа радиозатменных измерений спутников «Венера-15 и -16»»

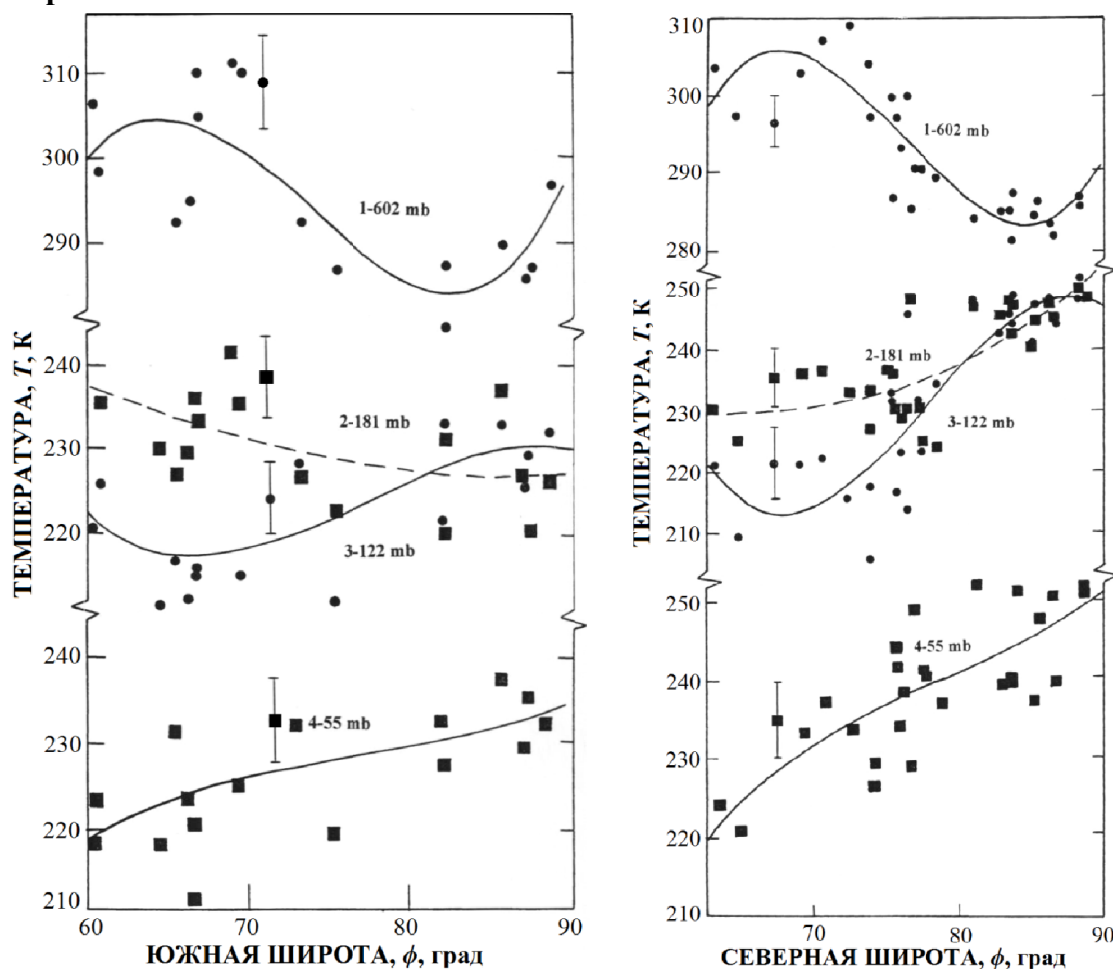


Рис. 1. Широтные зависимости температуры для Южного (левая панель) и Северного (правая панель) полушарий Венеры на четырех уровнях давления: 1–602 мбар; 2–181 мбар; 3–122 мбар; 4–55 мбар.

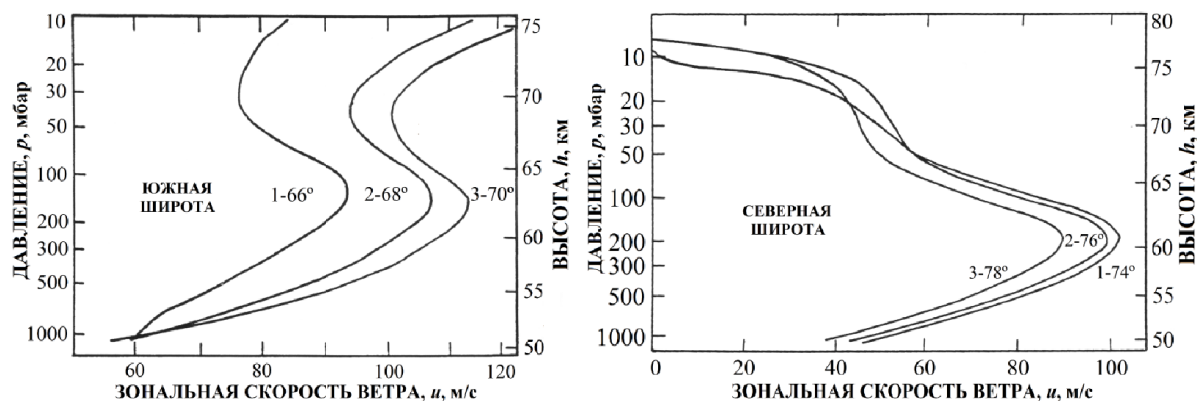


Рис. 2. Вертикальные профили зональной скорости ветра в приполярной атмосфере Южного (левая панель) и Северного (правая панель) полушарий планеты на трех широтных уровнях.

Статья: В.Н. Губенко, И.А. Кириллович

«Исследование зональной циркуляции атмосферы в высоких широтах Южного и Северного полушарий Венеры по данным анализа радиозатменных измерений спутников «Венера-15 и -16»»

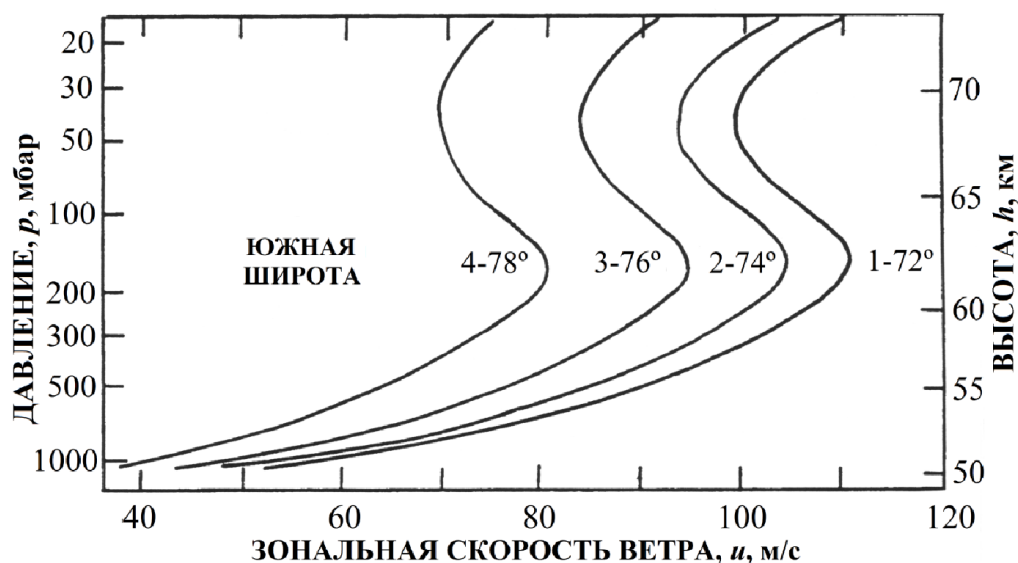


Рис. 3. Зависимости зональной скорости ветра от высоты в Южной приполярной атмосфере Венеры на широтах: 1–72°S; 2–74°S; 3–76°S; 4–78°S.

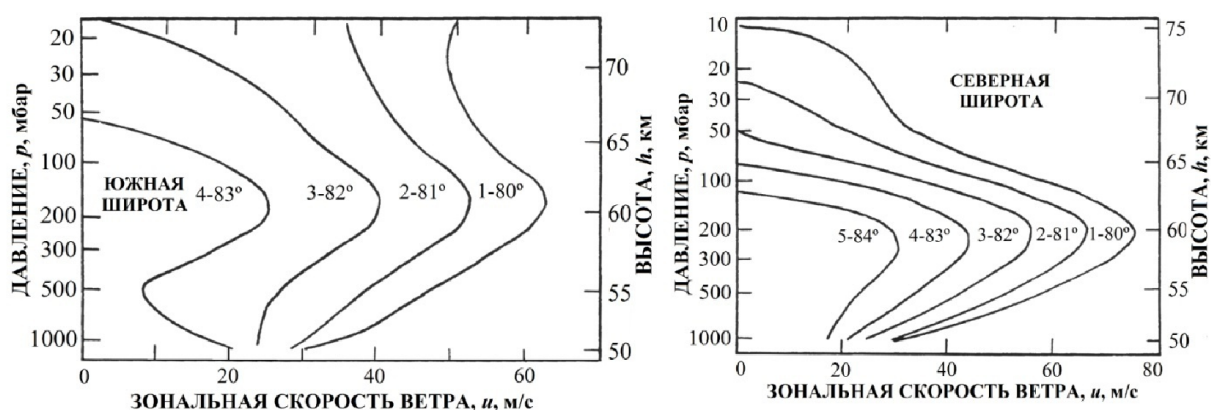


Рис. 4. Вертикальные профили зональной скорости ветра в полярной атмосфере Южного (левая панель) и Северного (правая панель) полушарий планеты на разных широтных уровнях.

Статья: В.Н. Губенко, И.А. Кириллович

«Исследование зональной циркуляции атмосферы в высоких широтах Южного и Северного полушарий Венеры по данным анализа радиозатменных измерений спутников «Венера-15 и -16»»

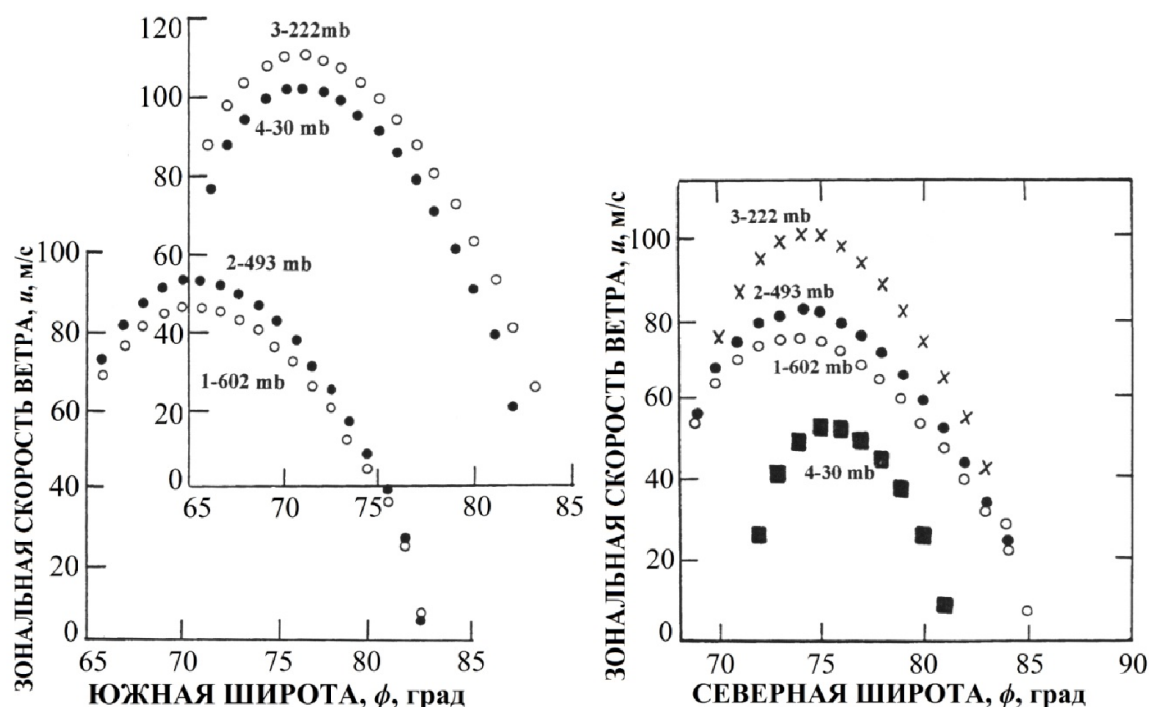


Рис. 5. Широтные зависимости зональной скорости ветра для Южного (левая панель) и Северного (правая панель) полушарий Венеры на четырех уровнях давления: 1–602 мбар; 2–493 мбар; 3–222 мбар; 4–30 мбар.

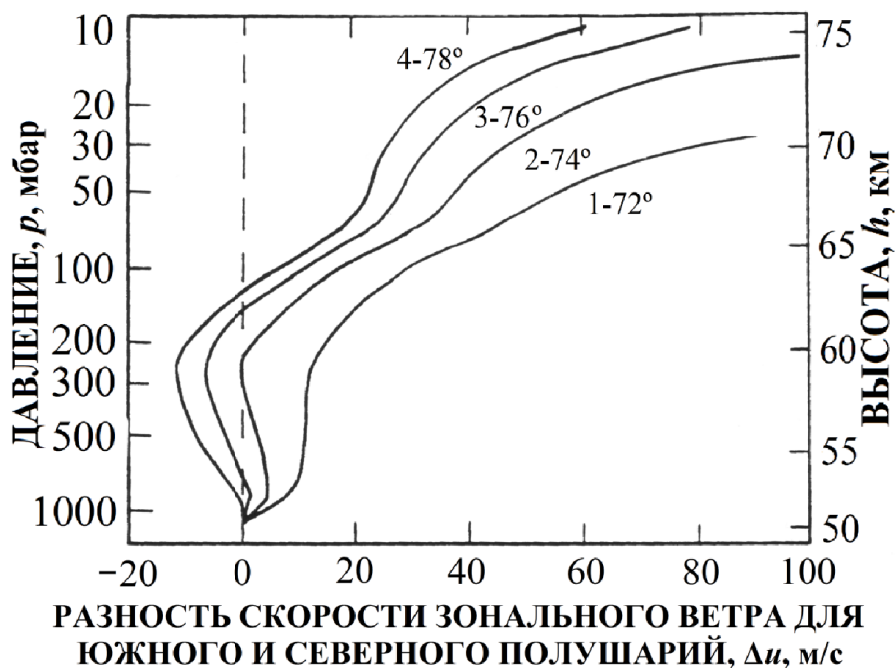


Рис. 6. Профили разности скорости зонального ветра в приполярной атмосфере Южного и Северного полушарий планеты на уровнях одинакового давления для четырех широтных диапазонов: 1–72°; 2–74°; 3–76°; 4–78°.

Статья: В.Н. Губенко, И.А. Кириллович

«Исследование зональной циркуляции атмосферы в высоких широтах Южного и Северного полушарий Венеры по данным анализа радиозатменных измерений спутников “Венера-15 и -16”»

Ключевые слова и их английские аналоги.

Атмосфера Венеры (Venus's atmosphere), радиозатменные измерения (radio occultation measurements), зональная циркуляция (zonal circulation), скорость ветра (wind speed), циклострофический баланс (cyclotrophic balance), струйное течение (jet flow).