

Исследование зональной циркуляции атмосферы Венеры по данным анализа радиозатменных измерений спутников “Венера-15 и -16”

В.Н. Губенко, И.А. Кириллович

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Московская область, 141190 Фрязино, пл. Введенского, дом 1, E-mail: vnugubenko@gmail.com.

Вертикальные профили температуры и давления, полученные из радиозатменных измерений спутников “Венера-15 и -16”, проведенных 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 от 60° до 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.

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.

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 анализа 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. На основе 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, предполагающий циклострофический баланс атмосферы на уровне верхней кромки облаков и ниже, был ранее предложен в работе [2] и успешно использован 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”. Значения вычисленной зональной скорости хорошо согласуются с результатами восстановления

вертикального профиля зональной скорости ветра методом дифференциальной интерферометрии с большой базой [7]. В исследованиях циркуляции атмосферы Венеры [8] и [8, 9], для нахождения зональной скорости также были использованы приближение циклострофического баланса 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 исключили возможности нарушения полусферической симметрии тепловой структуры атмосферы Венеры на высоких широтах. Вертикальные профили температуры и давления, полученные на основе анализа радиозатменных измерений “Venus Express” [10], также были использованы для нахождения зональных циклострофических ветров в мезосфере планеты в предположении полусферической симметрии [11]. В исследовании, проведенном авторами работы [11], отобранные ими для анализа 116 вертикальных профилей температуры полностью покрывали все широты только в Южном полушарии, а данные в Северном полушарии были ограничены высокими широтами.

Представляется важным установить, выполняется ли на самом деле используемое предположение о полусферической симметрии тепловой структуры атмосферы. Для этого необходимо определить зависимости зональной скорости ветра в атмосфере Северного и Южного полушарий планеты, по отдельности. Целью 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 спутниковых исследованиях “Венера-15 и -16”, а также о времени и месте проведения радиозатменных измерений (широта, долгота, зенитный угол Солнца) можно найти в следующих работах [12 – 15].

Обработка и анализ исходных экспериментальных данных “Венера-15 и -16”

Для определения зональной скорости ветра мы, в качестве исходных данных, использовали высотные профили температуры и давления, которые были получены при обработке радиозатменных измерений “Венера-15 и -16” частоты дециметровых радиоволн ($\lambda = 32$ см). Особенности методики и обработки экспериментальных измерений 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 определить 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 плотность 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 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 его > 1 мбар (< 85 км) ими можно пренебречь. 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 наших измерениях служил разброс температур на уровне давления 1 бар в интервале широт от 80° до 90°N . Было найдено, что среднеквадратичное отклонение значений указанной характеристики составляет 2.5 К [12]. В действительности, реальный разброс значений температуры может быть больше из-за пространственно-временной изменчивости атмосферы.

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 методом наименьших квадратов (МНК) на основе экспериментальных данных.

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).

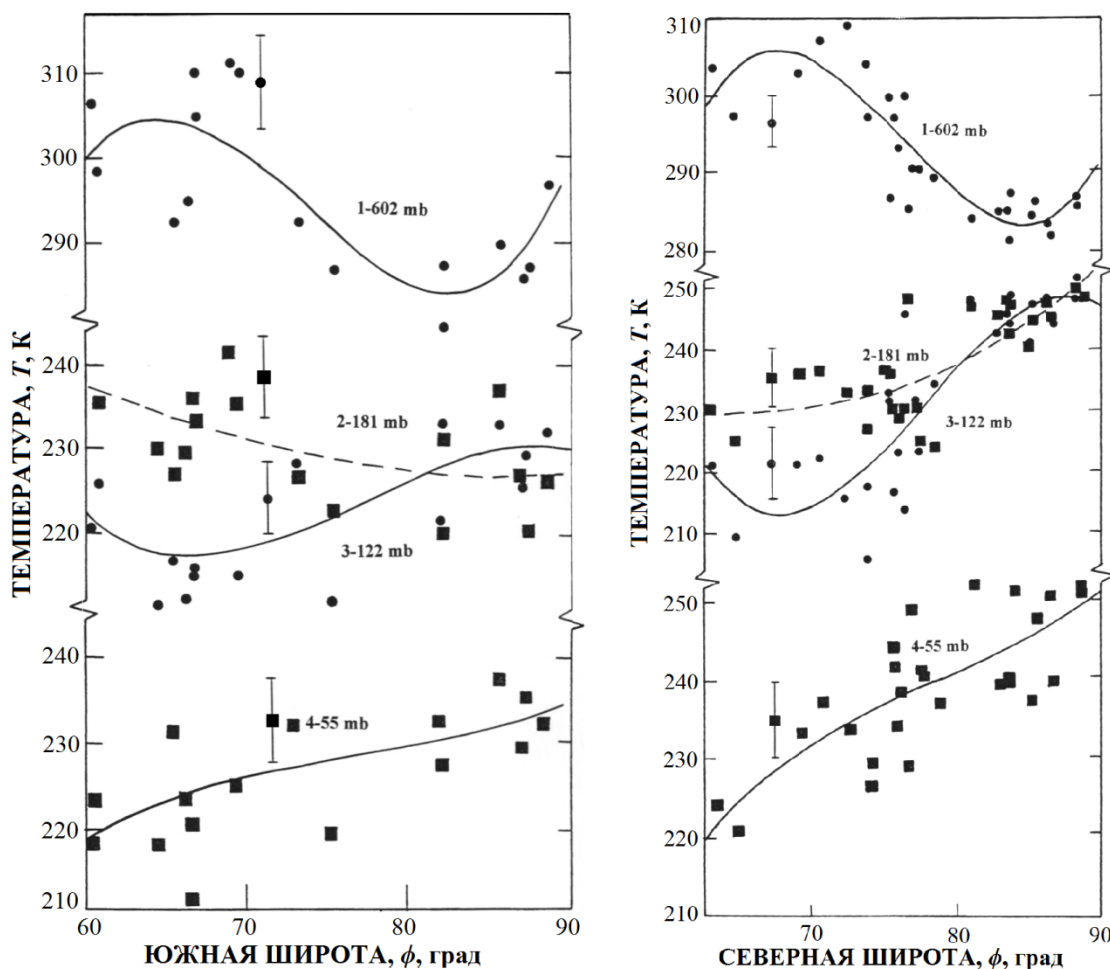


Рис. 1. Широтные зависимости температуры для Южного (левая панель) и Северного (правая панель) полушарий Венеры на четырех уровнях давления: 1 – 602 мбар; 2 – 181 мбар; 3 – 122 мбар; 4 – 55 мбар.

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 симметрии тепловой структуры атмосферы обоих полушарий 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, расположенной 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.

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,

ρ – плотность атмосферы,

y – локальная декартова координата в направлении полюса,

ϕ – широта,

a – средний радиус планеты,

p – давление [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, уравнение циклострофического баланса (1) можно представить в виде:

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

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,

$p_0 = 1098 \text{ мбар}$ – 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 $p_0 = 1098 \text{ мбар}$ (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] (Gubenko et al., 1992):

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

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 $p_0 = 1098 \text{ мбар}$. 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 $p_0 = 1098 \text{ мбар}$. Свидетельством в пользу данного предположения является полусферическая симметрия тепловой структуры атмосферы на уровнях с давлением $> 220 \text{ мбар}$ [12], которая обсуждалась выше.

Зональные ветры в атмосфере Южного и Северного полушарий Венеры

Предшествующие наблюдения циркуляции атмосферы Венеры выявили мощные струйные течения с максимумами зональной скорости, изменяющимся от $\sim 110 \text{ м/с}$ [21] до $\sim 140 \text{ м/с}$ [8] в интервале средних широт $50^\circ - 55^\circ \text{N}$. Анализ радиозатменных измерений “Венера-15 и -16” обнаружил джеты в высоких широтах ($> 70^\circ$) обоих полушариях планеты с максимумами скорости от ~ 100 до $\sim 115 \text{ м/с}$ в [20, 22]. Высокоширотное струйное течение с максимумом скорости $\sim 95 \text{ м/с}$, расположенное на высоте $\sim 60 \text{ км}$ и широте 70°N , было также 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 на широтах 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 ~ 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. 2. (правая панель) представлены зависимости зональной скорости ветра от высоты 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.

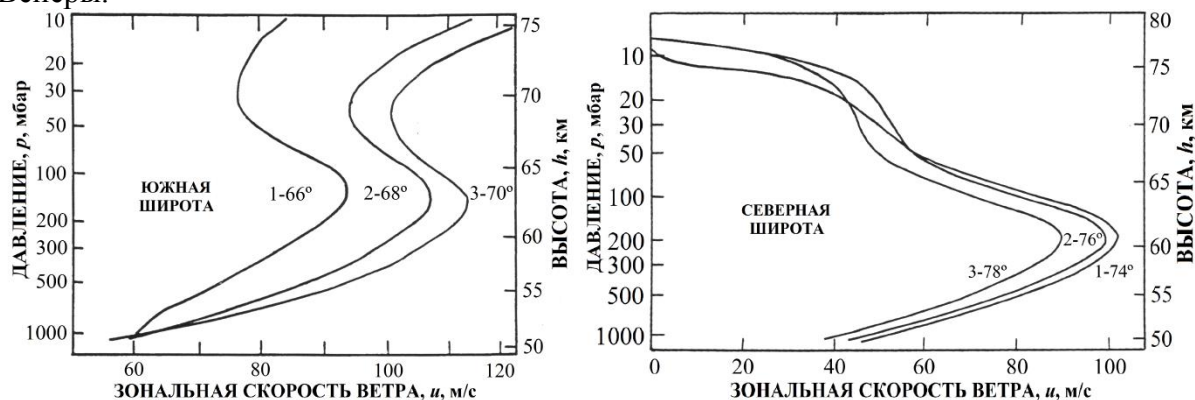


Рис. 2. Вертикальные профили зональной скорости ветра в приполярной атмосфере Южного (левая панель) и Северного (правая панель) полушарий Венеры на трех широтных уровнях.

Рис. 3. 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. 3. (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 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 $\phi > 83^\circ\text{S}$ некорректно, поскольку вычисляемые значения квадрата скорости ветра становятся отрицательными.

Кривые 1, 2, 3, 4 и 5 на рис. 3. (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 расположен несколько ниже – на высоте 58.5 км.

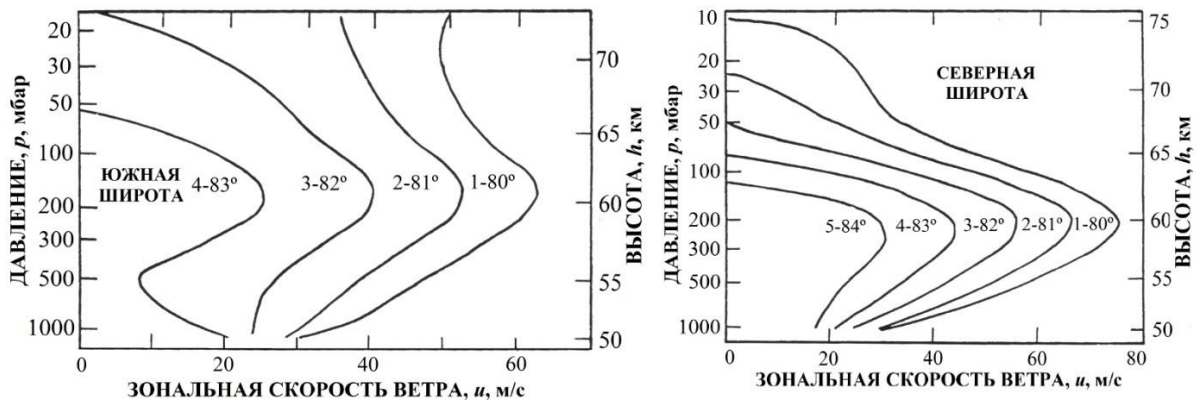


Рис. 3. Вертикальные профили зональной скорости ветра в полярной атмосфере Южного (левая панель) и Северного (правая панель) полушарий планеты на разных широтных уровнях.

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 ошибок задания граничных условий и определения широтных градиентов температуры, погрешности вычисления зональной скорости ветра на оси струйного течения составляют ± 25 м/с. Это значение 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. 4. 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. 4. (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.

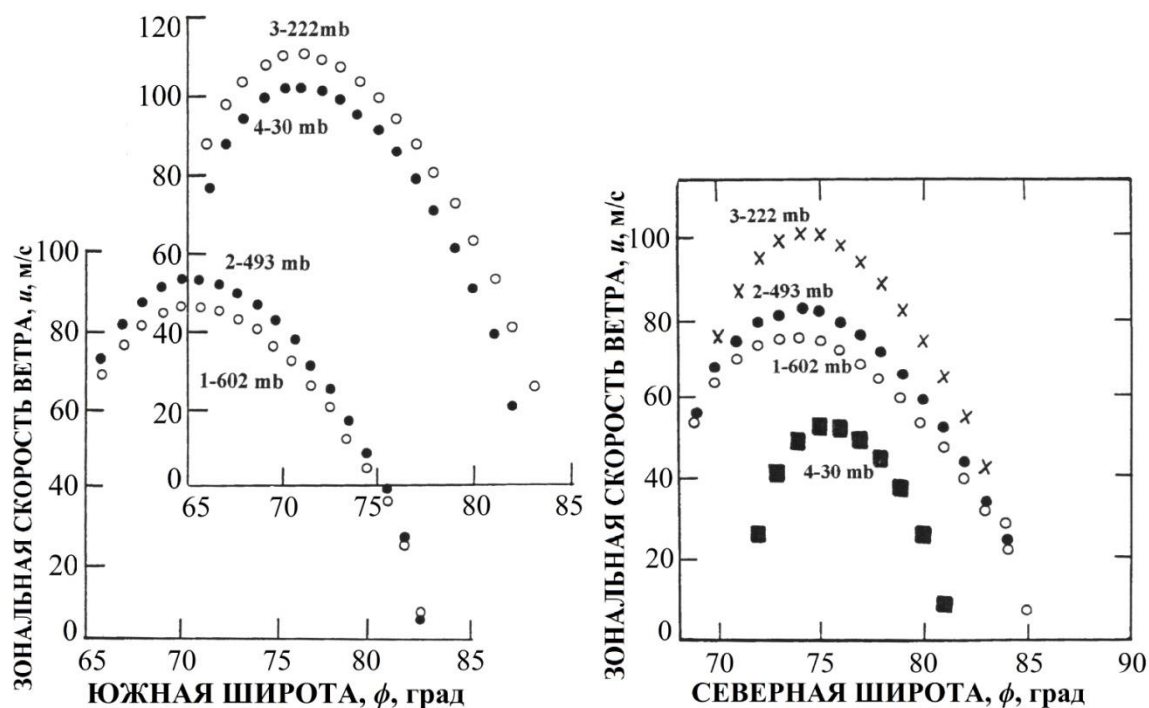


Рис. 4. Широтные зависимости зональной скорости ветра для Южного (левая панель) и Северного (правая панель) полушарий Венеры на четырех уровнях давления: 1 – 602 мбар; 2 – 493 мбар; 3 – 222 мбар; 4 – 30 мбар.

Заключение

Сравним полученные нами результаты с имеющимися сведениями о зональных ветрах на широтах более 60° 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 в высоких северных широтах планеты 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 максимальной скоростью ~ 95 м/с, ось которого, расположена на высоте ~ 61 км и широте 70°N [8]. При сравнении наших результатов с данными работы [8] обнаруживается незначительное изменение положения оси струйного течения на 4° по широте и на 1 км по высоте. Мы полагаем, что высотный сдвиг в 1 км может быть 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, авторы работы [8], определяя зональную скорость ветра, использовали всю совокупность данных о температуре без разделения ее на части в Северном и Южном полушариях. Последнее обстоятельство может исказить широтные зависимости температуры на уровнях давления близких к оси струйного течения. Учесть вклад указанных факторов на результаты определения положения струйного течения не представляется возможным. Если же положение оси струйного течения действительно меняется по широте с течением времени, то это обстоятельство может представлять интерес для понимания динамических процессов в атмосфере Венеры.

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 РАН.

Литература

1. Chub, E.Y., Yakovlev, O.I., 1980. Temperature and zonal circulation of the Venus atmosphere from radio occultation experiments. *Kosmich. Issled.* 18, 435–441.
2. Leovy, C.B., 1973. Rotation of the upper atmosphere of Venus. *J. Atmos. Sci.* 30, 1218–1220.
3. Seiff, A., Kirk, D.B., Young, R.E., Blanchard, R.C., Findlay, J.T., Kelly, G.N., Sommer, S.C., 1980. Measurements of thermal structure and thermal contrasts in the atmosphere of Venus: Results from the four Pioneer Venus probes. *J. Geophys. Res.* 85, 7903–7940.
4. Schubert, G., Covey, C., Del Genio, A.D., Elson, L.S., Keating, G., Seiff, A., Young, R.E., Apt, J., Counselman, C.C. III, Kliore, A.J., Limaye, S.S., Revercomb, H.E., Sromovsky, L.A., Suomi, V.E., Taylor, F., Woo, R., von Zahn, U., 1980. Structure and circulation of the Venus atmosphere. *J. Geophys. Res.* 85, 8007–8025.
5. Seiff, A., 1982. Dynamical implications of observed thermal contrasts in Venus upper atmosphere. *Icarus* 51, 574–592.
6. Schubert, G., 1983. General circulation and dynamical state of the Venus atmosphere. In: Hunten, D.M., Colin, L., Donahue, T.M., Moroz, V.I. (Eds.) *Venus*. University of Arizona Press, Tucson, 1183 pp.
7. Counselman, C.C. III, Gourevitch, S.A., King, R.W., Lorient, G.B., Ginsberg, E.S., Prinn, R.G., 1980. Zonal and meridional circulation of the lower atmosphere of Venus determined by radio interferometry. *J. Geophys. Res.* 85, 8026–8030.
8. Newman, M., Schubert, G., Kliore, A.J., Patel, I.R., 1984. Zonal winds in the middle atmosphere of Venus from Pioneer Venus radio occultation data. *J. Atmos. Sci.* 41 (12), 1901–1913.
9. Limaye, S.S., 1985. Venus atmospheric circulation: Observations and implications of the thermal structure. *Adv. Space Res.* 5 (9), 51–62.
10. Tellmann, S., Pätzold, M., Häusler, B., Bird, M.K., Tyler, G.L., 2009. Structure of the Venus neutral atmosphere as observed by the Radio Science experiment VeRa on Venus Express. *J. Geophys. Res. (Planets)*, 114, 19 pp.
11. Piccialli, A., Tellmann, S., Titov, D.V., Limaye, S.S., Khatuntsev, I.V., Pätzold, M., Häusler, B., 2012. Dynamical properties of the Venus mesosphere from the radio-occultation

- experiment VeRa onboard Venus Express. *Icarus* 217, 669–681.
12. Yakovlev, O.I., Matyugov, S.S., Gubenko, V.N., 1991. Venera-15 and -16 middle atmosphere profiles from radio occultations: Polar and near-polar atmosphere of Venus. *Icarus* 94 (2), 493–510, doi: 10.1016/0019-1035(91)90243-M.
 13. Gubenko, V.N., Yakovlev, O.I., Matyugov, S.S., 2001. Radio occultation measurements of the radio wave absorption and the sulfuric acid vapor content in the atmosphere of Venus. *Cosmic Res.* 39 (5), 439–445, doi: 10.1023/A:1012336911928.
 14. Gubenko, V.N., Andreev, V.E., 2003. Radio wave fluctuations and layered structure of the upper region of Venusian clouds from radio occultation data. *Cosmic Res.* 41 (2), 135–140, doi: 10.1023/A:1023378829327.
 15. Gubenko, V.N., Andreev, V.E., Pavelyev, A.G., 2008. Detection of layering in the upper cloud layer of Venus northern polar atmosphere observed from radio occultation data. *J. Geophys. Res. (Planets)* 113, E03001, doi: 10.1029/2007JE002940.
 16. Yakovlev, O.I., 1985. *Radiowave Propagation in Outer Space*, Nauka, Moscow, 215 pp.
 17. Kliore, A., 1972. *Mathematics of Profile Inversion*. In: L. Colin (Ed.) NASA TMX-62, Washington.
 18. Fjelbdo, G., Eshelman, V.R., 1968. The atmosphere of Mars analyzed by integral inversion of the Mariner-4 occultation data. *Planetary and Space Sci.* 16 (8), 1035–1054.
 19. Hoffman, J.H., Oyama, V.I., Zahn, U., 1980. Measurements of Venus lower atmosphere composition: A comparison of results. *J. Geophys. Res.* 85, 7871–7881.
 20. Gubenko, V.N., Matyugov, S.S., Yakovlev, O.I., Vaganov, I.R., 1992. Zonal wind in the south polar regions of Venus from the data of the radio transillumination. *Kosmich. Issled.* 30 (3), 390–395 (in Russian).
 21. Zasova, L.V., Linkin, V.M., Khatuntsev, I.V., 2000. Zonal wind in the middle atmosphere of Venus. *Cosmic Res.* 38, 49–65.
 22. Vaganov, I.R., Yakovlev, O.I., Matyugov, S.S., Gubenko, V.N., 1992. Wind in the northern polar atmosphere of Venus. *Kosmich. Issled.* 30 (5), 695–699 (in Russian).