

Спутниковый радиозатменный мониторинг активности внутренних волн в атмосфере Венеры

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: vnngubenko@gmail.com.

Радиозатменные измерения интенсивности сигнала ($\lambda = 32$ см) спутников Венера-15 и -16, проведенные в период с 16 по 31 октября 1983 года, используются для анализа активности внутренних волн в северной полярной атмосфере Венеры. Наблюдения интенсивности радиоволн обеспечивают важную информацию о мелкомасштабной структуре атмосферы. Сравнение радиозатменных измерений и результатов стандартной волновой теории показывает, что мелкомасштабные флуктуации интенсивности принимаемого сигнала обусловлены спектром вертикально распространяющихся внутренних гравитационных волн. Вертикальная длина этих флуктуаций на высоте >61.5 км составляет ~ 1 км. Разработанная модель для радиационного затухания флуктуаций интенсивности с высотой в атмосфере Венеры предполагает, что собственные частоты для идентифицированных внутренних атмосферных волн в исследуемых сеансах изменяются от $3.5 \cdot 10^4$ рад/с до $9.5 \cdot 10^4$ рад/с, а отношение горизонтальной и вертикальной длин волн заключено в интервале от 57 до 21.

Radio occultation measurements of signal intensity ($\lambda = 32$ cm) of the Venera-15 and -16 satellites made from 16 to 31 October 1983 are used for an analysis of internal wave activity in the Venus's northern polar atmosphere. Radio wave intensity observations provide important information about small-scale atmospheric structure. Through comparisons between radio occultation measurements and results of standard wave theory, we have shown that small-scale fluctuations in received signal intensity are caused by a spectrum of vertically propagating internal gravity waves. The vertical wavelength of these fluctuations is about 1 km at the altitude of >61.5 km. The developed model for radiative damping of intensity fluctuations with altitude in the Venus's atmosphere implies that the intrinsic frequencies of identified internal waves in the studied sessions vary from $3.5 \cdot 10^4$ rad/s to $9.5 \cdot 10^4$ rad/s, and the ratio of horizontal and vertical wavelengths is confined in the interval from 57 to 21.

Введение

Волновые процессы оказывают значительное влияние на циркуляцию, химический состав, тепловой режим и изменчивость атмосфер планет. Важная роль внутренних гравитационных волн (ВГВ), в первую очередь, связана с обеспечением ими эффективного механизма переноса энергии и импульса с нижних уровней атмосферы на верхние уровни. Источником генерации ВГВ в атмосфере могут являться: тепловые контрасты вблизи поверхности, топография, сдвиговая неустойчивость ветра, конвекция и фронтальные процессы. В атмосфере Земли, в отсутствие диссипации энергии, амплитуда волновых возмущений скорости ветра или температуры растет примерно экспоненциально с увеличением высоты и поэтому возмущения с малой амплитудой вблизи поверхности могут производить значительные эффекты на больших высотах, где происходит обрушение волн и передача волновой энергии и импульса в невозмущенный поток. Поскольку ВГВ являются характерной особенностью устойчиво стратифицированной атмосферы, то аналогичные эффекты можно ожидать в атмосферах Венеры и Марса. Интерпретация наблюдений флуктуаций скорости ветра, температуры или плотности в атмосфере нередко основывается на модели широкого спектра волн, порождающих эти флуктуации. Спектральное описание подразумевает, что волновое поле флуктуаций состоит из многих компонент с различными масштабами. Во многих случаях экспериментальные спектры флуктуаций температуры, плотности или скорости ветра в атмосфере демонстрируют

на фоне гладкого спектра узкие пики, которые указывают на квазипериодическую структуру возмущений в некотором диапазоне высот. Результаты прямых зондовых измерений в стратосфере Земли свидетельствуют о том, что формирование такой структуры может быть обусловлено распространением монохроматической волны, которая находится в состоянии насыщения вследствие сдвиговой неустойчивости в атмосфере. Преимуществом радиозатменных измерений с целью изучения внутренних волн в атмосфере является широкий географический и временной охват исследуемых районов, позволяющий проводить глобальный мониторинг волновой активности в атмосфере планеты [1–3].

Интенсивные радиозатменные исследования атмосферы Венеры были выполнены нами с помощью спутников Венера-15 и -16 в период с октября 1983 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. Двухчастотные радионаблюдения (длины волн 5 и 32 см) были проведены в 176 атмосферных районах, расположенных на дневной и ночной стороне Северного и Южного полушарий планеты. В приполярной и полярной области Южного полушария Венеры, где ранее проводились только единичные измерения, были получены новые данные об атмосферных характеристиках для 20 районов. Результаты, найденные на основе этих данных, включают: (I) вертикальные профили плотности, давления, температуры, а также характерные параметры для 42 районов полярной и приполярной атмосферы на высотах 42–90 км и оценки ошибок определяемых величин [4]; (II) характеристики тонких регулярных слоев в атмосфере Венеры [5, 6]; (III) вертикальные профили содержания паров серной кислоты и поглощения радиоволн диапазона 5 см в атмосфере планеты [7]; (IV) высотные и широтные зависимости зональной скорости ветра в атмосфере Венеры [8–10]; (V) вертикальные профили температуры, давления и градиентов температуры для средних широт планеты на высотах 40–90 км [11].

Мы используем некоторые из указанных выше результатов и радиозатменные измерения интенсивности сигнала спутников Венера-15 и -16 для исследования мелкомасштабных внутренних волн в северной полярной атмосфере Венеры на высотах более 61.5 км. Целью этой работы является представление и анализ измерений интенсивности сигнала ($\lambda = 32$ см) спутников Венера-15 и -16, проведенных в период с 16 по 31 октября 1983 года, которые используются нами для изучения активности внутренних волн в полярной атмосфере на основе разработанной модели радиационного затухания флуктуаций интенсивности с высотой. Отсчет высоты производится от уровня средней поверхности Венеры с радиусом 6051 км.

Радиационное затухание внутренних атмосферных волн: анализ радиозатменных измерений интенсивности сигнала спутников Венера-15 и -16

Наблюдения интенсивности радиозатменного сигнала обеспечивают важную информацию о мелкомасштабной структуре атмосферы планеты. Наш метод определения характеристик атмосферных волн во многих аспектах совпадает с методом, представленным ранее в работах [12, 13]. Авторы указанных выше работ предположили, что радиационное затухание является основным процессом, вносящим вклад в диссипацию ВГВ с вертикальными длинами волн < 4 км, наблюдающихся в радиозатменных экспериментах. На рис. 1 представлен пример измерений интенсивности сигнала ($\lambda = 32$ см) для трех анализируемых радиозатменных сеансов Венера-15 и -16. Интенсивность остается примерно постоянной до тех пор, пока не начинается просвечивание нейтральной атмосферы (относительное время ~ 0 сек, высота ~ 100 км). На рис. 1 хорошо виден отклик радиоволн при прохождении дневной ионосферы вблизи терминатора (зенитный угол Солнца равен $Z_{\odot} = 85.8^{\circ}$ для сеанса 24 и $Z_{\odot} = 87.2^{\circ}$ для сеанса 30) и ночной ионосферы вблизи терминатора ($Z_{\odot} = 95.4^{\circ}$ для сеанса 42). Как известно, минимумы интенсивности сигнала соответствуют максимумам электронной концентрации в ионосферных слоях [14]. Из данных, представленных на

рис. 1 следует, что структура дневной ионосферы вблизи терминатора является двухслойной, а ночная ионосфера вблизи терминатора – однослойная. Учитывая, что здесь вертикальная скорость опускания радиолуча равна ~ 4.3 км/с [6], находим, что ионосферные максимумы вблизи терминатора как на дневной, так и на ночной стороне Венеры расположены на высоте примерно 150 км.

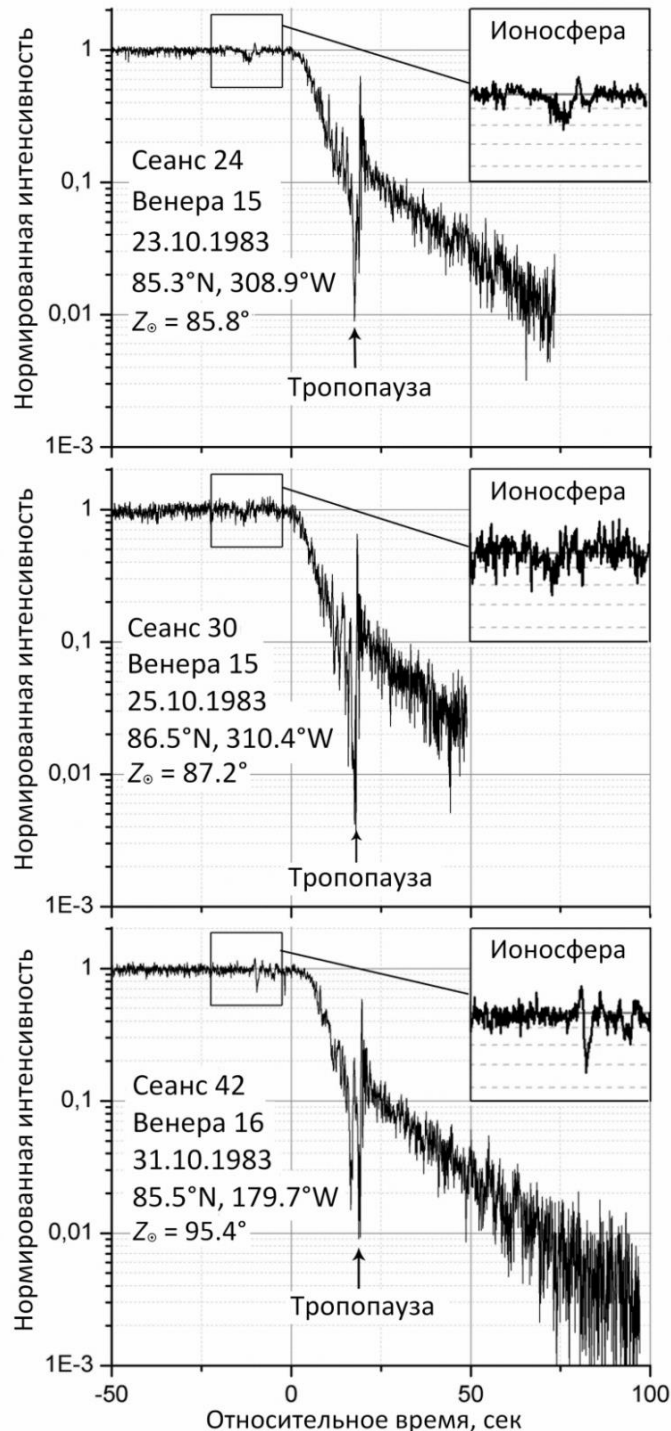


Рис. 1. Измерения интенсивности сигнала ($\lambda = 32$ см) в зависимости от времени в полярной атмосфере Венеры для радиозатменных сеансов: 24, 30 и 42 (заходы) спутников Венера-15 и -16. Время $t = 0$ сек соответствует высоте лучевой траектории ~ 100 км (средний радиус Венеры равен 6051 км). Тропопаузы зондируемых районов атмосферы расположены на высотах: ~ 57.6 км (сеансы 24, 30) и ~ 59.0 км (сеанс 42) [4].

В табл. 1 представлены параметры радиозатменных сеансов Венера-15 и -16, которые были проанализированы нами в этой работе с целью мониторинга активности внутренних волн и определения их характеристик в северной полярной атмосфере Венеры. Здесь указаны: номер и время проведения сеанса измерений, аппарат, широта и долгота зондируемого района, зенитный угол Солнца (Z_{\odot}), высота тропопаузы (h_t) и высота минимума температуры (h_{\min}) для района измерений. Данные характеристики были получены при проведении обработки и анализа данных с целью определения атмосферных профилей плотности, давления и температуры [4].

Таблица 1. Параметры радиозатменных сеансов, анализируемых с целью определения характеристик внутренних волн в полярной атмосфере Венеры

Сеанс 10	Сеанс 12	Сеанс 20	Сеанс 24	Сеанс 30	Сеанс 32	Сеанс 42
Венера-16	Венера-16	Венера-15	Венера-15	Венера-15	Венера-16	Венера-16
16.10.1983	17.10.1983	21.10.1983	23.10.1983	25.10.1983	25.10.1983	31.10.1983
83.9°N, 290.0°W	83.1°N, 296.3°W	83.8°N, 306.9°W	85.3°N, 308.9°W	86.5°N, 310.4°W	88.5°N, 225.3°W	85.5°N, 179.7°W
$Z_{\odot} = 83.9^{\circ}$	$Z_{\odot} = 83.2^{\circ}$	$Z_{\odot} = 84.1^{\circ}$	$Z_{\odot} = 85.8^{\circ}$	$Z_{\odot} = 87.2^{\circ}$	$Z_{\odot} = 90.9^{\circ}$	$Z_{\odot} = 95.4^{\circ}$
$h_t = 57.5$ км	$h_t = 57.6$ км	$h_t = 57.3$ км	$h_t = 57.6$ км	$h_t = 57.6$ км	$h_t = 57.4$ км	$h_t = 59.0$ км
$h_{\min} = 58.7$ км	$h_{\min} = 58.7$ км	$h_{\min} = 57.9$ км	$h_{\min} = 58.4$ км	$h_{\min} = 58.4$ км	$h_{\min} = 58.9$ км	$h_{\min} = 59.0$ км

Удобно представить данные об интенсивности радиозатменного сигнала как функцию высоты (h) траектории луча (высоты перигея луча). Здесь “траектория луча” относится к траектории фотона, движущегося от спутника к приемной антенне на Земле. Высота перигея луча как функция времени определяется естественным образом в процессе обработки и анализа данных при получении атмосферных профилей [4]. Мы применили высокочастотный пространственный фильтр к данным об интенсивности сигнала с целью разделения высокочастотных флуктуаций интенсивности и медленных фоновых вариаций. Этот фильтр действует следующим образом:

$$i(h) \equiv \frac{I(h) - \langle I(h) \rangle}{\langle I(h) \rangle}. \quad (1)$$

Здесь $I(h)$ – измеряемая интенсивность сигнала, h – высота перигея луча. Угловые скобки обозначают локальные средние, вычисленные на основе аппроксимации значений $I(h)$ квадратичным полиномом на интервале 4 км, центр которого находится в точке с высотой h . Поскольку, по определению, $I(h) > 0$, то величина относительных флуктуаций интенсивности $i(h)$ удовлетворяет неравенству $i(h) > -1$. Однако, в экспериментах часто наблюдаются мощные всплески (спайки) интенсивности радиозатменного сигнала, и величина $i(h)$ может существенно превосходить +1. По этой причине, наблюдаемая картина флуктуаций может быть асимметричной относительно нуля, когда значения $|i(h)|$ приближаются к единице [12].

Когда $|i(h)| \ll 1$ (слабое рассеяние), $i(h) \propto \rho'(h)$, т.е. флуктуации интенсивности $i(h)$ пропорциональны вариациям атмосферной плотности $\rho'(h)$ [15]. Согласно результатам волновой теории [12], имеем:

$$\rho' \propto G_{\rho}(h) \exp \left[j \int^h m(h) dh \right], \quad (2)$$

где $m = 2\pi/\lambda_z$ – вертикальное волновое число, λ_z – вертикальная длина волны, j – мнимая единица, а амплитудная функция G_ρ описывается формулой (3), в которой: ρ_b и N_b – невозмущенные (фоновые) значения атмосферной плотности и частоты Брента-Вяйсяля, соответственно; L_r – вертикальный масштаб длины радиационного затухания (демпинга).

$$G_\rho(h) \equiv (\rho_b N_b^3)^{1/2} \exp\left[-\int^h \frac{dh}{L_r(h)}\right]. \quad (3)$$

В отсутствие диссипации энергии, $\rho'(h)$ будет, в общем, уменьшаться с высотой как $\sqrt{\rho_b(h)}$, но с дополнительной модуляцией вследствие вертикальных вариаций $N_b(h)$. Темп роста или убывания амплитуды флуктуаций интенсивности определяется вертикальным масштабом радиационного затухания L_r , который связан со временем радиационной релаксации τ_r простой формулой [12]:

$$L_r \equiv 2 \left| \frac{\omega}{m} \right| \tau_r, \quad (4)$$

где ω – собственная частота внутренней волны, измеряемая в системе отсчета, движущейся вместе с невозмущенным ветром, τ_r – время радиационной релаксации в атмосфере Венеры [16]. Собственная частота ω и частота σ внутренней волны, измеренная в системе отсчета земного наблюдателя, связаны известным соотношением, определяющим доплеровское смещение между ними [14, 17–21]:

$$\sigma = \omega + \mathbf{k}_h \mathbf{V}_b = \omega + |k_h| \cdot |V_b| \cos \angle \mathbf{k}_h, \mathbf{V}_b, \quad (5)$$

где $\mathbf{k}_h \mathbf{V}_b$ – скалярное произведение между горизонтальным волновым вектором \mathbf{k}_h и вектором невозмущенной скорости ветра \mathbf{V}_b , $|k_h| = 2\pi/\lambda_h$ – модуль вектора \mathbf{k}_h , λ_h – горизонтальная длина внутренней волны, $|V_b|$ – модуль вектора \mathbf{V}_b .

На рис. 2 представлены высотные зависимости времени радиационной релаксации $\tau_r(h)$ в атмосфере Венеры для вертикальных длин волн 5 км (штриховая), 2.5 км (пунктир) и 1 км (сплошная), найденные путем экстраполяции результатов модели [22] для $\lambda_z = 7$ км в предположении, что время затухания пропорционально вертикальной длине волны. Зависимость τ_r для вертикальной длины волны $\lambda_z = 1$ км была определена нами для анализа флуктуаций интенсивности $i(h)$, а профили $\tau_r(h)$ для длин волн 5 и 2.5 км, полученные ранее в работе [23, Fig. 7], приведены на рис. 2 для сравнения.

На рис. 3 представлены примеры профилей быстрых флуктуаций (сцинтилляций) интенсивности $i(h)$, наблюдаемых в радиозатменных сеансах 24, 30 и 42 (зубчатые линии). Высота лучевой траектории отсчитывается здесь от уровня средней поверхности Венеры с радиусом 6051 км. Быстрые флуктуации интенсивности представляют собой дифракционные эффекты, обусловленные мелкомасштабными неоднородностями в атмосфере Венеры. Как следует из результатов работы [6], дифракционную картину на уровне тропопаузы в полярной атмосфере планеты формирует неоднородности с вертикальным размером < 0.32 км (радиус первой зоны Френеля). Неоднородности больших вертикальных размеров, наблюдающиеся в радиозатменных экспериментах, не вносят вклад в дифракционную картину и могут быть обусловлены влиянием регулярных тонких слоев и/или внутренних атмосферных волн [6]. На рис. 3 представлена огибающая амплитуды флуктуаций интенсивности $G_\rho(h)$, вычисленная с помощью уравнения (3) и результатов восстановления средних профилей $\rho_b(h)$ и $N_b(h)$

[4]. Гладкие штриховые линии показывают, как величина амплитуды флуктуаций интенсивности изменяется с высотой согласно волновой теории (включая эффект радиационного затухания). На высотах ~ 61.5 км и выше, где эффекты радиационного затухания становятся заметными, доминирующий вертикальный размер флуктуаций интенсивности составляет ~ 1 км. Найдено, что вертикальный масштаб для радиационного затухания флуктуаций (L_r) в атмосфере Венеры равен $L_r = 8700$ м (высота отсчета снизу равна $h_{\text{ref}} = 61.8$ км, рис. 3) для сеанса 24; $L_r = 6500$ м ($h_{\text{ref}} = 61.5$ км) для сеанса 30; $L_r = 12000$ м ($h_{\text{ref}} = 62.3$ км) для сеанса 42.

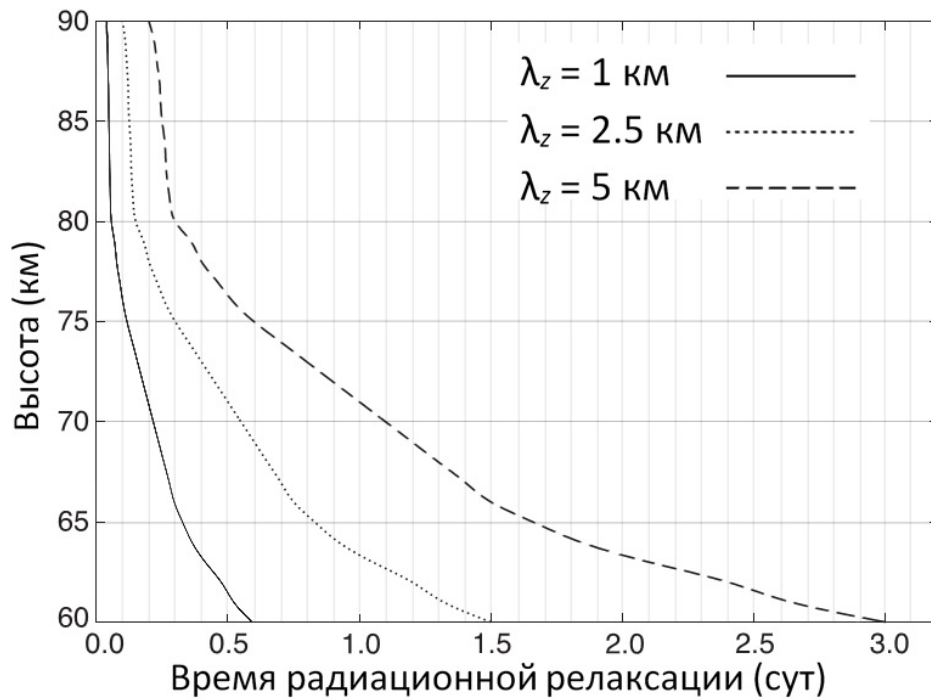


Рис. 2. Время радиационной релаксации в атмосфере Венеры для вертикальных длин волн 5 км (штриховая), 2.5 км (пунктир) и 1 км (сплошная), найденное путем экстраполяции результатов модели [22].

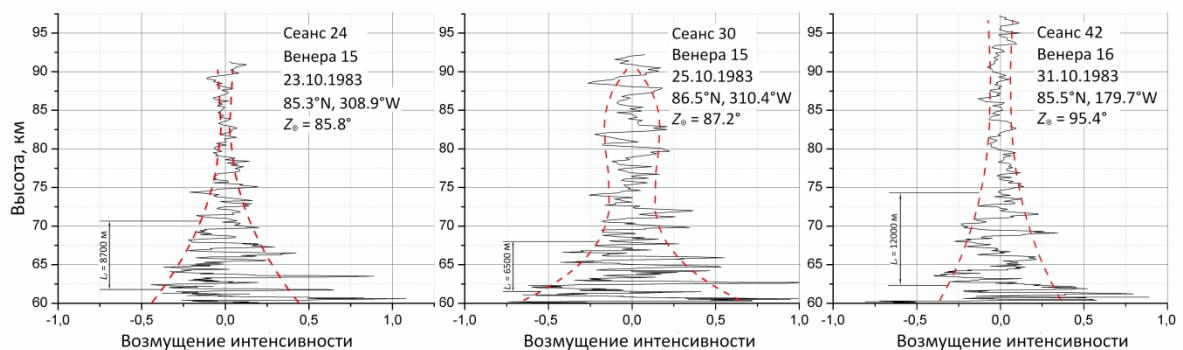


Рис. 3. Быстрые флуктуации интенсивности $i(h)$, наблюдаемые в трех радиозатменных сеансах 24, 30 и 42 (зубчатые линии). Высота лучевой траектории, отсчитывается от уровня средней поверхности Венеры с радиусом 6051 км. Гладкие линии показывают, как величина флуктуаций изменяется с высотой согласно волновой теории (включая эффект радиационного затухания). Вертикальный масштаб длины для радиационного затухания (L_r) в атмосфере Венеры равен $L_r = 8700$ м ($h_{\text{ref}} = 61.8$ км) для сеанса 24; $L_r = 6500$ м ($h_{\text{ref}} = 61.5$ км) для сеанса 30; $L_r = 12000$ м ($h_{\text{ref}} = 62.3$ км) для сеанса 42.

Ключевые характеристики внутренних гравитационных волн в полярной атмосфере Венеры, полученные из анализа семи сеансов радиозатменных измерений интенсивности сигнала ($\lambda = 32$ см) спутников Венера-15 и -16, приведены в табл. 2. Метод вычисления волновых параметров базируется на использовании формулы (4). Сначала, по результатам анализа вертикального профиля флуктуаций интенсивности сигнала, определяется вертикальный масштаб радиационного затухания (L_r) для данного сеанса измерений. На следующем этапе вычисляется время радиационной релаксации в атмосфере Венеры (τ_r) для анализируемых флуктуаций интенсивности с вертикальной длины волны $\lambda_z = 1$ км, локализованных в заданном интервале высот (см. рис. 2). Затем, с помощью выражения (4), определяется собственная частота (ω) идентифицируемой внутренней волны. Далее, на основе дисперсионного уравнения $\omega/N_b = |k_h|/|m| = \lambda_z/\lambda_h$ для внутренних волн в интервале промежуточных собственных частот ($f^2 \ll \omega^2 \ll N_b^2$) и оценки невозмущенной частоты Брента-Вяйсяля $N_b = 0.02$ рад/с находится горизонтальная длина волны (λ_h). На последнем этапе определяются собственные горизонтальная ($|c_{ph}^{in}| = \omega / |k_h|$) и вертикальная ($|c_{pz}^{in}| = \omega / |m|$) фазовые скорости, а также собственный период ($\tau_i = 2\pi/\omega$) для ВГВ [14, 17–20]. Разработанная модель для радиационного затухания флуктуаций интенсивности с высотой в атмосфере Венеры предполагает, что собственные частоты для идентифицированных внутренних атмосферных волн в исследуемых сеансах изменяются от $3.5 \cdot 10^{-4}$ рад/с до $9.5 \cdot 10^{-4}$ рад/с, а отношение горизонтальной и вертикальной длин волн заключено в интервале от 57 до 21. Собственные периоды ВГВ составляют от 1.8 до 5 часов, а горизонтальные длины волн изменяются в пределах 21 – 57 км (см. табл. 2).

Таблица 2. Характеристики внутренних гравитационных волн в атмосфере Венеры, полученные из измерений интенсивности радиозатменного сигнала ($\lambda = 32$ см) спутников Венера-15 и -16

Номер сеанса	h_{ref} , км	L_r , м	τ_r , сек	$L_r/(2\tau_r)$, м/с	ω , рад/с	τ_i , час	N_b , рад/с	λ_z , м	λ_h , м	$ c_{ph}^{in} $, м/с	$ c_{pz}^{in} $, м/с
10	62.2	$4.6 \cdot 10^3$	$41.0 \cdot 10^3$	0.056	$3.5 \cdot 10^{-4}$	5.0	$2.0 \cdot 10^{-2}$	$\sim 10^3$	$57 \cdot 10^3$	3.2	$5.6 \cdot 10^{-2}$
12	63.0	$5.2 \cdot 10^3$	$36.7 \cdot 10^3$	0.071	$4.5 \cdot 10^{-4}$	3.9	$2.0 \cdot 10^{-2}$	$\sim 10^3$	$44 \cdot 10^3$	3.2	$7.3 \cdot 10^{-2}$
20	62.4	$8.4 \cdot 10^3$	$39.8 \cdot 10^3$	0.105	$6.6 \cdot 10^{-4}$	2.6	$2.0 \cdot 10^{-2}$	$\sim 10^3$	$30 \cdot 10^3$	3.2	$11 \cdot 10^{-2}$
24	61.8	$8.7 \cdot 10^3$	$43.2 \cdot 10^3$	0.100	$6.3 \cdot 10^{-4}$	2.8	$2.0 \cdot 10^{-2}$	$\sim 10^3$	$32 \cdot 10^3$	3.2	$10 \cdot 10^{-2}$
30	61.5	$6.5 \cdot 10^3$	$44.3 \cdot 10^3$	0.073	$4.6 \cdot 10^{-4}$	3.8	$2.0 \cdot 10^{-2}$	$\sim 10^3$	$43 \cdot 10^3$	3.2	$7.4 \cdot 10^{-2}$
32	62.3	$12.2 \cdot 10^3$	$40.1 \cdot 10^3$	0.152	$9.5 \cdot 10^{-4}$	1.8	$2.0 \cdot 10^{-2}$	$\sim 10^3$	$21 \cdot 10^3$	3.2	$15 \cdot 10^{-2}$
42	62.3	$12.0 \cdot 10^3$	$40.1 \cdot 10^3$	0.150	$9.4 \cdot 10^{-4}$	1.9	$2.0 \cdot 10^{-2}$	$\sim 10^3$	$21 \cdot 10^3$	3.2	$15 \cdot 10^{-2}$

Заключение

Радиозатменные измерения интенсивности сигнала ($\lambda = 32$ см) спутников Венера-15 и -16, проведенные в период с 16 по 31 октября 1983 года, используются для анализа активности внутренних волн в северной полярной атмосфере Венеры. Наблюдения интенсивности радиоволн обеспечивают важную информацию о мелкомасштабной структуре атмосферы. Сравнение радиозатменных измерений и результатов стандартной волновой теории показывает, что мелкомасштабные флуктуации интенсивности принимаемого сигнала обусловлены спектром вертикально распространяющихся внутренних гравитационных волн. Вертикальная длина этих флуктуаций на высоте >61.5 км составляет ~ 1 км. Разработанная модель для

радиационного затухания флуктуаций интенсивности с высотой в атмосфере Венеры предполагает, что собственные частоты для идентифицированных внутренних атмосферных волн в исследуемых сеансах изменяются от $3.5 \cdot 10^{-4}$ рад/с до $9.5 \cdot 10^{-4}$ рад/с, а отношение горизонтальной и вертикальной длин волн заключено в интервале от 57 до 21. Собственные периоды ВГВ составляют от 1.8 до 5 часов, а горизонтальные длины волн изменяются в пределах от 21 до 57 км.

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

Литература

1. Губенко В.Н., Павельев А.Г., Андреев В.Е., Кириллович И.А., Салимзянов Р.Р. Радиозатменные исследования внутренних волн и слоистых структур в атмосферах Земли, Марса и Венеры. Монография: Современные достижения в плазменной гелиогеофизике / Под ред. Л.М. Зеленого, А.А. Петруковича, И.С. Веселовского. – М.: ИКИ РАН, 2016. – 672 с. – ISBN 978-5-00015-011-5, Часть IV – «Ионосфера и верхняя атмосфера», Глава IV.6, С. 548–554, <http://iki.cosmos.ru/books/2016petrukovich-2.pdf>.
2. Губенко В.Н., Кириллович И.А., Павельев А.Г., Андреев В.Е. Обнаружение насыщенных внутренних гравитационных волн и реконструкция их характеристик в атмосфере Марса // Известия ВУЗов. Физика. 2016. Т. 59. №12-2. С. 46–49.
3. Губенко В.Н., Кириллович И.А., Лиу Й.-А., Павельев А.Г. Мониторинг активности внутренних гравитационных волн в атмосфере Арктики и Антарктики // Известия ВУЗов. Физика. 2016. Т. 59. №12-3. С. 80–85.
4. 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. No. 2. P. 493–510. doi: 10.1016/0019-1035(91)90243-M.
5. 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. No. 2. P. 135–140. doi: 10.1023/A:1023378829327.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Gubenko V.N., Kirillovich I.A. The Study of Zonal Circulation of Venus's Atmosphere by Data Analysis of Radio Occultation Measurements Made by Venera-15 and -16 Satellites // Cosmic Res. 2018. V. 56. No. 6. P. 471–479. doi: 10.1134/S0010952518060047.
11. Матюгов С.С., Губенко В.Н., Яковлев О.И., Ваганов И.Р. Атмосфера Венеры в средних широтах по данным радиопросвечивания // Космич. исслед. 1994. Т. 32. № 3. С. 108–114.
12. Hinson D. P., Jenkins J. M. Magellan radio occultation measurements of atmospheric waves on Venus // Icarus. 1995. V. 114. P. 310–327.
13. Tellmann S., Hausler B., Hinson D.P., Tyler G.L., Andert T.P., Bird M.K., Imamura T., Patzold M., Remus S. Small-scale temperature fluctuations seen by the VeRa radio science

- experiment on Venus Express // *Icarus*. 2012. V. 221. P. 471–480. doi: 10.1016/j.icarus.2012.08.023.
14. Gubenko V.N., Pavelyev A.G., Kirillovich I.A., Liou Y.-A. Case study of inclined sporadic E layers in the Earth's ionosphere observed by CHAMP/GPS radio occultations: coupling between the tilted plasma layers and internal waves // *Adv. Space Res.* 2018. V. 61. No. 7. P. 1702–1716. doi: 10.1016/j.asr.2017.10.001.
15. Hinson D.P., Tyler G.L. Internal gravity waves in Titan's atmosphere observed by Voyager radio occultation // *Icarus*. 1983. V. 54. P. 337–352.
16. Fels S.B. A parameterization of scale-dependent radiative damping grace in the middle atmosphere // *J Atmos. Sci.* 1982. V. 39. P. 1141–1152.
17. Gubenko V.N., Pavelyev A.G., Andreev V.E. Determination of the intrinsic frequency and other wave parameters from a single vertical temperature or density profile measurement // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. No. D08109. doi:10.1029/2007JD008920.
18. Gubenko V.N., Pavelyev A.G., Salimzyanov R.R., Pavelyev A.A. Reconstruction of internal gravity wave parameters from radio occultation retrievals of vertical temperature profiles in the Earth's atmosphere // *Atmos. Meas. Tech.* 2011. V. 4. No. 10. P. 2153–2162. doi: 10.5194/amt-4-2153-2011.
19. Gubenko V.N., Pavelyev A.G., Salimzyanov R.R., Andreev V.E. A method for determination of internal gravity wave parameters from a vertical temperature or density profile measurement in the Earth's atmosphere // *Cosmic Res.* 2012. V. 50. No. 1. P. 21–31. doi: 10.1134/S0010952512010029.
20. Gubenko V.N., Kirillovich I.A., Pavelyev A.G. Characteristics of internal waves in the Martian atmosphere obtained on the basis of an analysis of vertical temperature profiles of the Mars Global Surveyor mission // *Cosmic Res.* 2015. V. 53. No. 2. P. 133–142. doi: 10.1134/S0010952515020021.
21. Gubenko V.N., Kirillovich I.A. Diagnostics of internal atmospheric wave saturation and determination of their characteristics in Earth's stratosphere from radiosonde measurements // *Sol.-Terr. Phys.* 2018. V. 4. No. 2. P. 41–48. doi: 10.12737/stp-42201807.
22. Crisp D. Radiative forcing of the Venus mesosphere. II. Thermal fluxes, cooling rates, and radiative equilibrium temperatures // *Icarus*. 1989. V. 77. P. 391–413.
23. Ando H., Imamura T., Tsuda T., Tellmann S., Patzold M., Hausler B. Vertical wavenumber spectra of gravity waves in the Venus atmosphere obtained from *Venus Express* radio occultation data: Evidence for saturation // *J. Atmos. Sci.* 2015. V. 72. P. 2318–2329. doi: 10.1175/JAS-D-14-0315.1.