

Мелкомасштабные внутренние волны в полярной атмосфере Венеры по данным анализа интенсивности радиозатменных сигналов спутников Венера-15 и -16

***Губенко В.Н., Кириллович И.А., Губенко Т.В.,
Андреев В.Е., Губенко Д.В.***

*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Фрязинский филиал (ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН), пл. акад. Б.А.
Введенского, дом 1, 141190 Фрязино, Московская обл., Россия*

e-mail: vngubenko@gmail.com

**Семнадцатая Всероссийская Открытая конференция «СОВРЕМЕННЫЕ
ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА
(Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей
среды, потенциально опасных явлений и объектов)»**

11 - 15 ноября 2019 года, ИКИ РАН, Москва

Введение: В период с октября 1983 по сентябрь 1984 года с помощью спутников Венера-15 и -16 были проведены двухчастотные (длины волн 5 и 32 см) радиозатменные исследования в 176 атмосферных районах, расположенных на дневной и ночной стороне Северного и Южного полушарий Венеры. Орбиты спутников были такими, что заходы за планету имели место в Северном полушарии планеты, а выходы – в Южном.

Наблюдения интенсивности радиозатменных сигналов обеспечивают важную информацию о мелкомасштабной структуре волновых процессов в атмосфере планеты. Известно, что внутренние волны являются характерной особенностью устойчиво стратифицированных атмосфер планет земной группы. Сравнение радиозатменных данных с результатами стандартной волновой теории показывает, что мелкомасштабные флуктуации интенсивности принимаемого сигнала ($\lambda = 32$ см) в полярной атмосфере Венеры обусловлены спектром вертикально распространяющихся внутренних гравитационных волн (ВГВ) (вертикальная длина волны $\lambda_z = 1$ км).

Цель работы: изучение активности мелкомасштабных внутренних волн в северной полярной атмосфере Венеры (с помощью разработанной модели радиационного затухания флуктуаций интенсивности с высотой) на основе анализа радиозатменных измерений интенсивности сигнала ($\lambda = 32$ см) спутников Венера-15 и -16, проведенных с 16 по 31 октября 1983 года.

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

В таблице 1 представлены параметры радиозатменных сеансов Венера-15 и -16, которые были проанализированы в этой работе с целью мониторинга активности мелкомасштабных 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 определены нами при проведении обработки и анализа данных в процессе восстановления атмосферных профилей плотности, давления и температуры (Yakovlev et al., 1991).

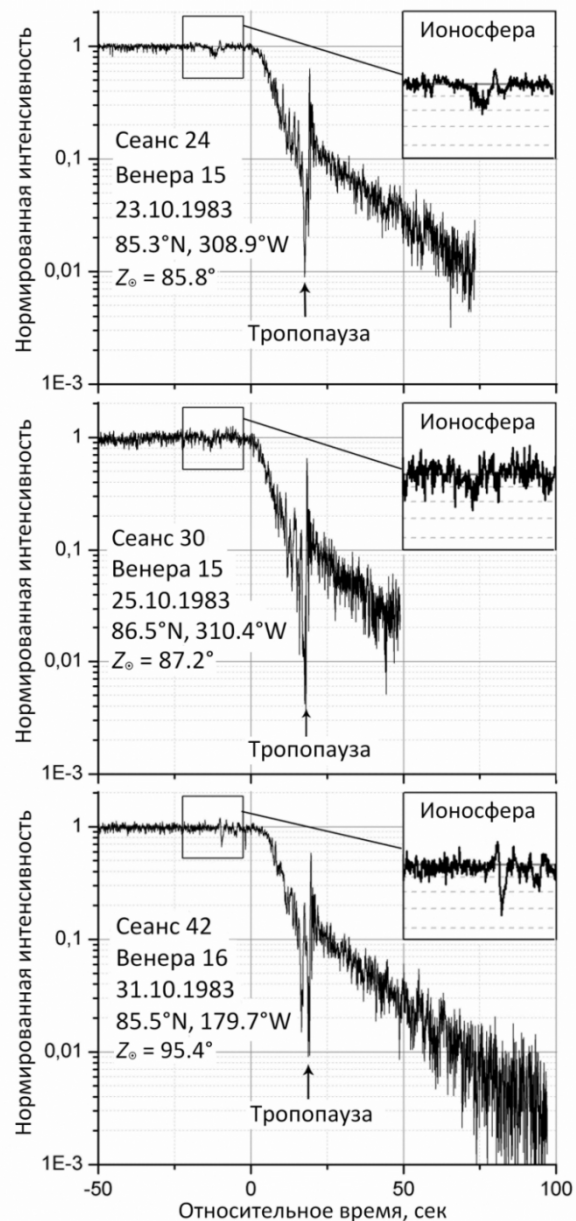


Рис. 1. Примеры радиозатменных измерений интенсивности сигнала ($\lambda = 32$ см) в зависимости от времени в полярной атмосфере Венеры для сеансов 24, 30 и 42 (заходы) спутников Венера-15 и -16. Время $t = 0$ сек соответствует высоте лучевой траектории ~ 100 км (средний радиус Венеры равен 6051 км). Тропопаузы зондируемых районов атмосферы расположены на высотах: ~ 57.6 км (сеансы 24, 30) и ~ 59.0 км (сеанс 42) (Yakovlev et al., 1991).

Интенсивность радиозатменного сигнала 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 (Gubenko et al., 2018). Из данных, представленных на рис. 1 следует, что вертикальная 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 (Gubenko et al., 2008a), находим, что ионосферные максимумы вблизи терминатора как на дневной, так и на ночной стороне Венеры расположены на высоте примерно 150 км.

Радиационное затухание внутренних волн в атмосфере Венеры

В случае слабого рассеяния, когда $|i(h)| \ll 1$, флуктуации интенсивности радиозатменного сигнала $i(h)$ пропорциональны вариациям атмосферной плотности $\rho'(h)$. Согласно результатам теории внутренних атмосферных волн (Hinson, Tyler, 1983; Hinson, Jenkins, 1995), имеем:

$$i(h) \propto \rho'(h) \propto G_\rho(h) \exp\left[j \int^h m(h) dh\right], \quad (1)$$

где $m = 2\pi/\lambda_z$ – вертикальное волновое число, λ_z – вертикальная длина волны, j – мнимая единица, а флуктуации интенсивности $i(h)$ определяются формулой (2), в которой: $I(h)$ и $\langle I(h) \rangle$ – измеряемая и средняя интенсивность сигнала, соответственно, h – высота перигея радиолуча.

$$i(h) \equiv \frac{I(h) - \langle I(h) \rangle}{\langle I(h) \rangle}. \quad (2)$$

Угловые скобки здесь обозначают локальные средние, вычисленные на основе аппроксимации значений $I(h)$ квадратичным полиномом на вертикальном интервале в 4 км, центр которого расположен в точке с высотой h . Амплитудная функция $G_\rho(h)$ находится с помощью выражения (3), в котором: ρ_b и N_b – невозмущенные (фоновые) значения атмосферной плотности и частоты Брента-Вайсяля, соответственно, а L_r – вертикальный масштаб длины радиационного затухания (демпинга) амплитуды флуктуаций плотности (интенсивности $i(h)$).

Радиационное затухание внутренних волн в атмосфере Венеры (продолжение)

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

В отсутствие диссипации волновой энергии, $\rho'(h)$ будет, в общем, уменьшаться с высотой $\propto \sqrt{\rho_b(h)}$, 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 возмущений плотности (интенсивности сигнала) простой формулой (Hinson, Jenkins, 1995):

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

где ω – собственная частота внутренней волны, измеряемая в системе отсчета, движущейся вместе с невозмущенным ветром, τ_r – время радиационной релаксации возмущений в атмосфере планеты (Fels, 1982).

Собственная частота ω и частота σ внутренней волны, найденная в системе отсчета земного наблюдателя, связаны известным соотношением, определяющим доплеровское смещение между ними (Gubenko et al., 2008b, 2011, 2012, 2015, 2018; Gubenko, Kirillovich, 2018):

Радиационное затухание внутренних волн в атмосфере Венеры (продолжение)

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

где $\mathbf{k}_h \mathbf{V}_b$ – скалярное произведение горизонтального волнового вектора \mathbf{k}_h и вектора 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 .

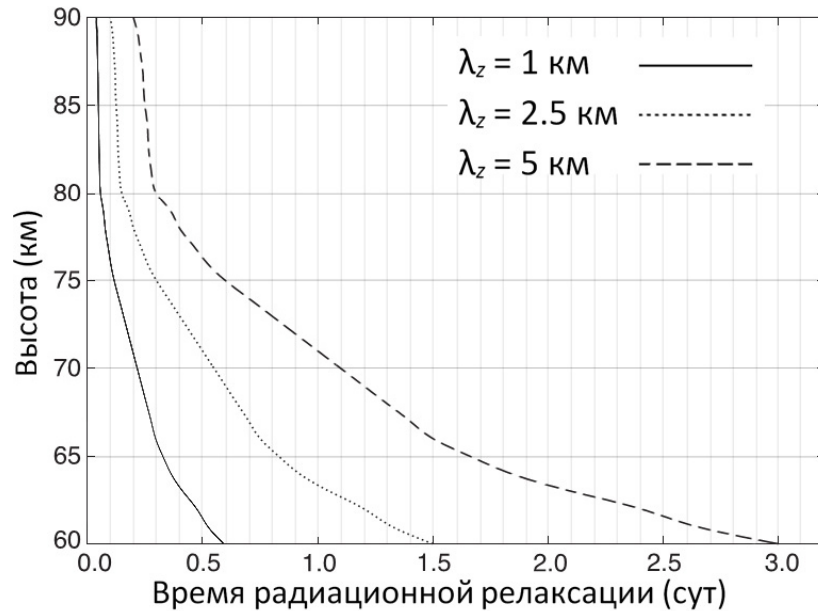


Рис. 2. Время радиационной релаксации τ_r возмущений плотности в атмосфере Венеры для вертикальных длин волн 5 км (штриховая), 2.5 км (пунктир) и 1 км (сплошная), найденное путем экстраполяции результатов модели (Crisp, 1989).

На рис. 2 представлены высотные профили времени радиационной релаксации $\tau_r(h)$ возмущений плотности в атмосфере Венеры для трех вертикальных длин волн, найденные путем экстраполяции результатов модели (Crisp, 1989) для $\lambda_z = 7$ км в предположении, что время затухания возмущений плотности пропорционально вертикальной длине волны. Зависимость τ_r для вертикальной длины волны $\lambda_z = 1$ км была определена нами для анализа флуктуаций интенсивности $i(h)$ сигнала ($\lambda = 32$ см), а профили $\tau_r(h)$ для длин волн 5 и 2.5 км, полученные ранее в работе (Ando et al., 2015, Fig. 7), приведены на рис. 2 для сравнения.

Волновой анализ радиозатменных измерений интенсивности сигнала ($\lambda = 32$ см) спутников Венера-15 и -16

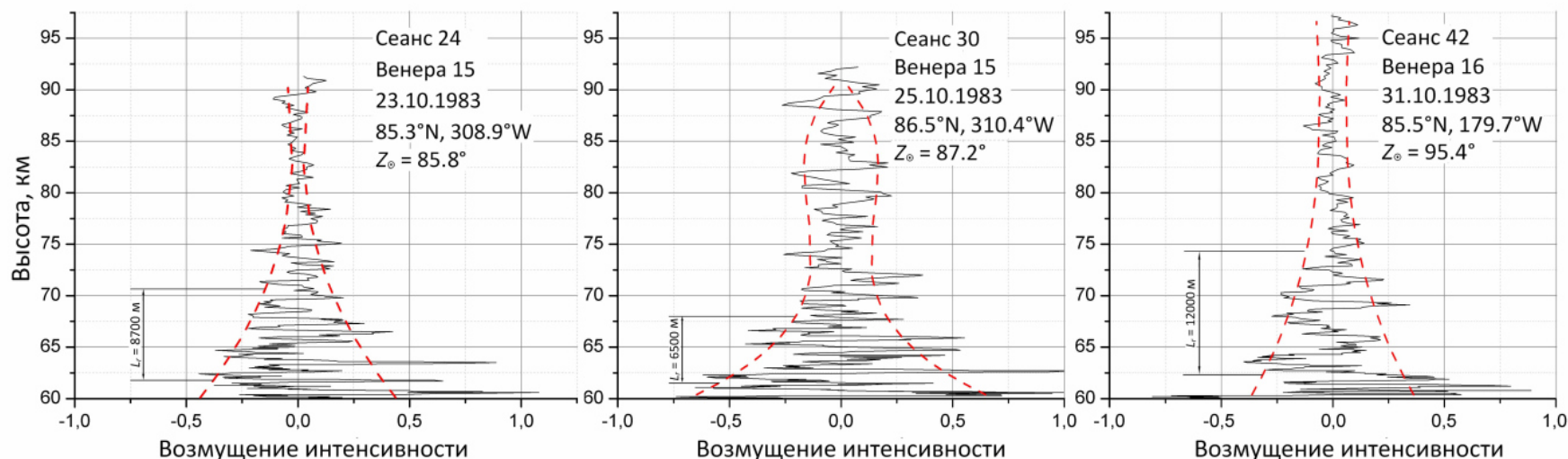


Рис. 3. Быстрые флуктуации интенсивности $i(h)$, наблюдаемые в трех радиозатменных сеансах 24, 30 и 42 (зубчатые линии). Высота лучевой траектории, отсчитывается от уровня средней поверхности Венеры с радиусом 6051 км. Гладкие линии показывают, как величина флуктуаций изменяется с высотой согласно волновой 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.

На рис. 3 представлены примеры профилей быстрых флуктуаций (сцинтилляций) интенсивности $i(h)$, наблюдаемых в радиозатменных сеансах 24, 30 и 42 (зубчатые линии). Быстрые флуктуации интенсивности представляют собой дифракционные эффекты, обусловленные мелкомасштабными неоднородностями в атмосфере Венеры. Как следует из результатов работы (Gubenko et al., 2008a), 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 не вносят вклад в дифракционную картину и могут быть обусловлены влиянием регулярных тонких слоев и/или внутренних атмосферных волн (Gubenko et al., 2008a).

Волновой анализ радиозатменных измерений интенсивности сигнала ($\lambda = 32$ см) спутников Венера-15 и -16 (продолжение)

На рис. 3 показаны огибающие амплитуды флуктуаций интенсивности $G_p(h)$, вычисленные с помощью уравнения (3) и результатов восстановления средних профилей $\rho_b(h)$ и $N_b(h)$ (Yakovlev et al., 1991). Гладкие штриховые линии демонстрируют, 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. 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 таблице 2. Метод вычисления волновых параметров состоит в следующем:

I) Сначала, по результатам анализа вертикального профиля флуктуаций интенсивности сигнала, определяется вертикальный масштаб радиационного затухания (L_r) для данного сеанса измерений.

II) 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).

III) Затем, с помощью выражения (4), определяется собственная частота (ω) идентифицируемой внутренней волны.

IV) 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).

V) 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 (Gubenko et al., 2008b, 2011, 2012, 2015, 2018). 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.

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 высотах ~ 61.5 км и выше 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, а также частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект РФФИ № 19-02-00083 А) и Программой № 12 Президиума РАН.

Литература

- 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.
- Crisp D. Radiative forcing of the Venus mesosphere. II. Thermal fluxes, cooling rates, and radiative equilibrium temperatures // *Icarus.* 1989. V. 77. P. 391–413.
- Fels S.B. A parameterization of scale-dependent radiative damping grace in the middle atmosphere // *J Atmos. Sci.* 1982. V. 39. P. 1141–1152.
- 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.* 2008a. V. 113. No. E03001. doi: 10.1029/2007JE002940.
- 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.* 2008b. V. 113. No. D08109. doi:10.1029/2007JD008920.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Hinson D. P., Jenkins J. M. Magellan radio occultation measurements of atmospheric waves on Venus // *Icarus.* 1995. V. 114. P. 310–327.
- 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.

Спасибо за внимание!