

# Изучение внутренних гравитационных волн по радиозатменным данным о температуре в атмосфере Венеры

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

*ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, пл. акад. Б.А. Введенского,  
дом 1, 141190 Фрязино, Московская обл., Россия*



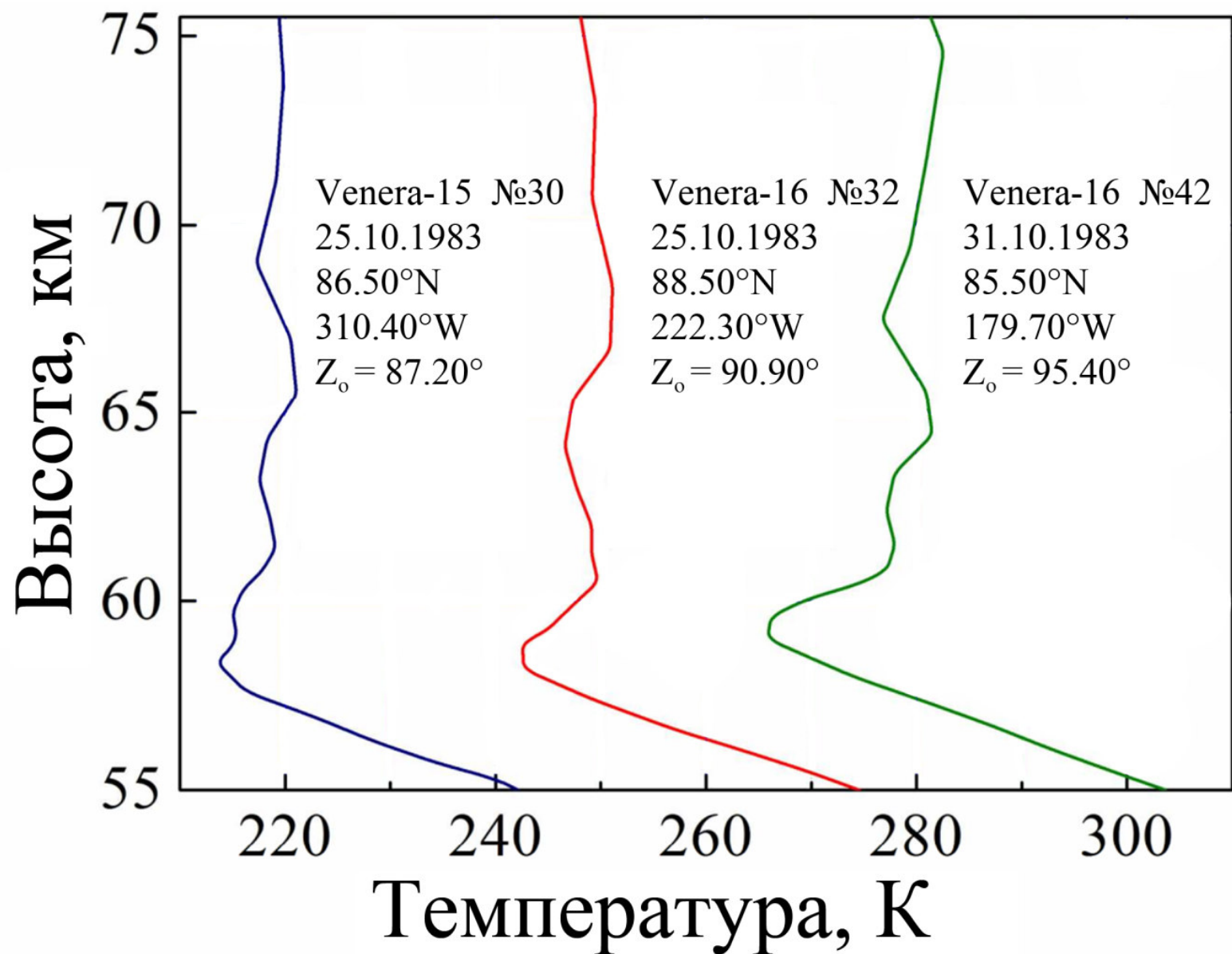
*E-mail: [gubenko@fireras.su](mailto:gubenko@fireras.su)*

**Двадцать третья международная конференция «СОВРЕМЕННЫЕ  
ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ  
КОСМОСА»**

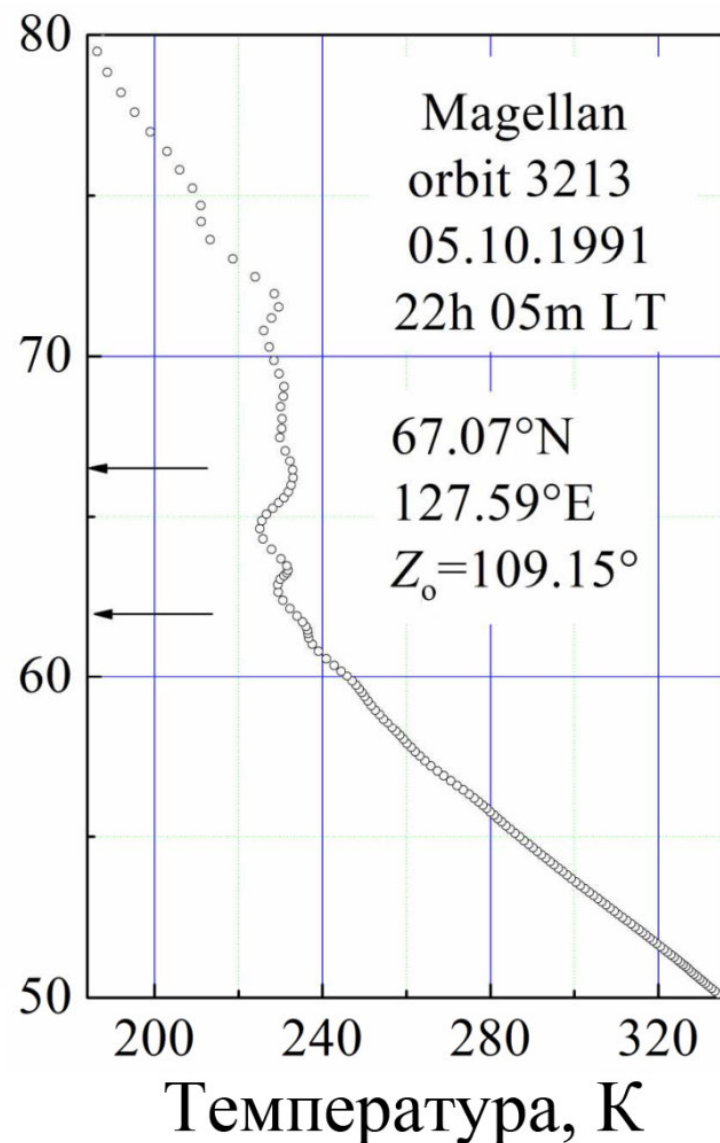
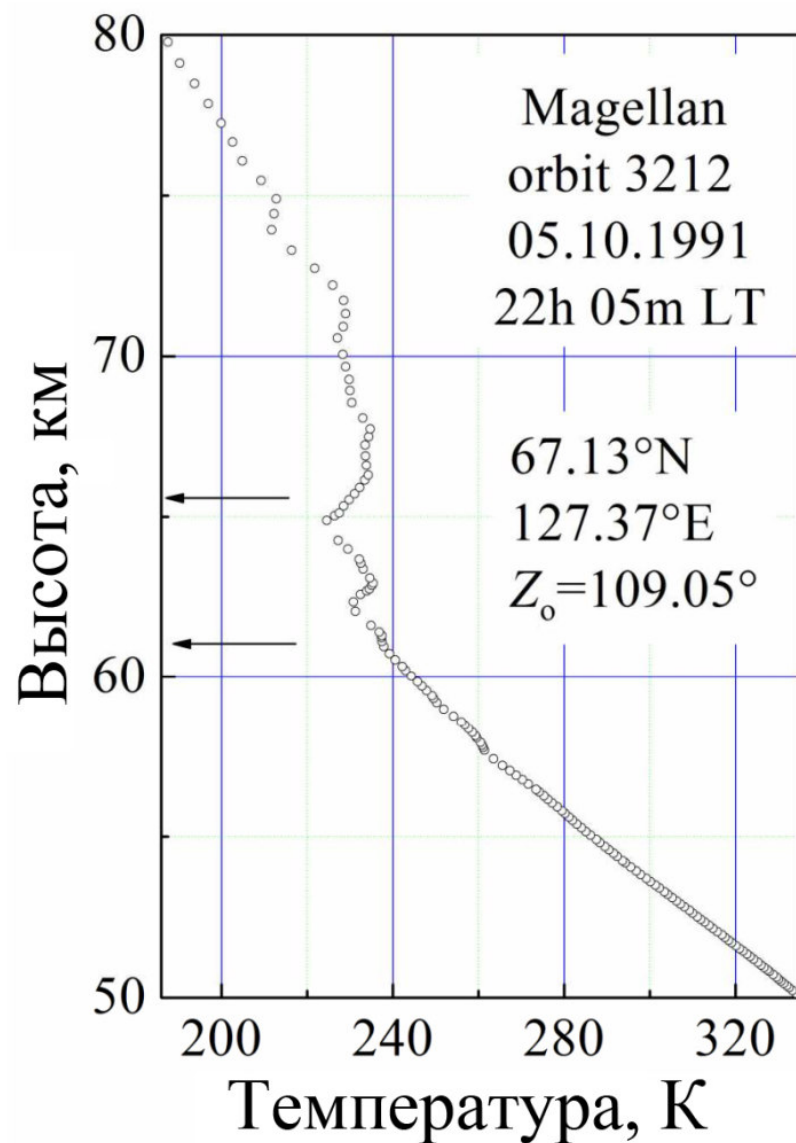
**10 - 14 ноября 2025 года, ИКИ РАН, Москва**

**Введение:** Важная роль внутренних гравитационных волн (ВГВ) связана с обеспечением ими эффективного механизма переноса энергии и горизонтального импульса из нижних уровней атмосферы на верхние. Источником генерации ВГВ в атмосфере могут являться: тепловые контрасты вблизи поверхности, вертикальные смещения атмосферы вследствие потоков над топографией, сдвиговая неустойчивость фонового 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 энергии и горизонтального импульса ВГВ в невозмущенный поток. Поскольку ВГВ являются особенностью устойчиво стратифицированной атмосферы, то аналогичные эффекты можно ожидать и в атмосфере Венеры.

Целью работы является применение разработанного нами SWA-метода к анализу вертикальных профилей температуры, восстановленных из радиозатменных измерений спутниковой миссии *Magellan*, для идентификации ВГВ и реконструкции волновых характеристик в атмосфере Венеры.



**Рис. 1.** Примеры волновых вариаций в полярной атмосфере Венеры, наблюдаемых в радиозатменных профилях температуры *Венера-15* и *-16*. Профили № 30 и 42 смещены по горизонтали на  $\pm 30$  К относительно профиля № 32. Зенитные углы Солнца  $Z_0$ , координаты и даты проведения измерений представлены на рис. 1.



**Рис. 2.** Вертикальные профили температуры, восстановленные из радиозатменных измерений спутника *Magellan* для двух последовательных витков орбит – 3212 и 3213. Указаны зенитные углы Солнца  $Z_0$ , координаты, время и дата проведения измерений. Интервалы осцилляций температуры отмечены стрелками.

**Таблица 1.** Характеристики ВГВ в атмосфере Венеры, которые были получены двумя независимыми методами из радиозатменных данных о температуре для трех последовательных витков орбит 3212–3214 спутника Магеллан

<b>Исходные радиозатменные данные для анализа (статья НД)</b>	
Зенитный угол Солнца (SZA)	109°
Местное истинное солнечное время (LTST)	22 ч 05 мин
Широта, $\phi$	67°N
Долгота	127°E
Высота, $h$ (Радиус Венеры $R_0 = 6052$ км)	$\geq 57$ км
Ускорение гравитации $^a, g$	8.7 м/с <sup>2</sup>
Угловая скорость вращения атмосферы, $\Omega$	$-1.5 \cdot 10^{-5}$ рад/с (в западном направлении)
Параметр Кориолиса, $ f  =  2\Omega \cdot \sin \phi $	$2.7 \cdot 10^{-5}$ рад/с (на широте 67°N)
Инерционный период, $\tau_f = 2\pi/ f $	$\sim 64.6$ ч $\approx 2.7$ суток (на широте 67°N)
Невозмущенная температура $^{a,*}, T_b$	$\sim 230$ К
Невозмущенная частота плавучести $^{a,*}, N_b$	$\sim 2.13 \cdot 10^{-2}$ рад/с
Вертикальная длина волны $^a, \lambda_z = 2\pi/ m $	2.5 км
Вертикальное волновое число $^a,  m $	$\sim 2.5 \cdot 10^{-3}$ м <sup>-1</sup>
Амплитуда возмущений температуры $^a,  T' $	4.0 К
Нормированная амплитуда температурных возмущений $^{a,*},  T'/T_b $	$\sim 17.4 \cdot 10^{-3}$

<sup>a</sup> На высоте 65 км, \* вычислено нами на основе данных статьи НД (*Hinson and Jenkins, 1995*)

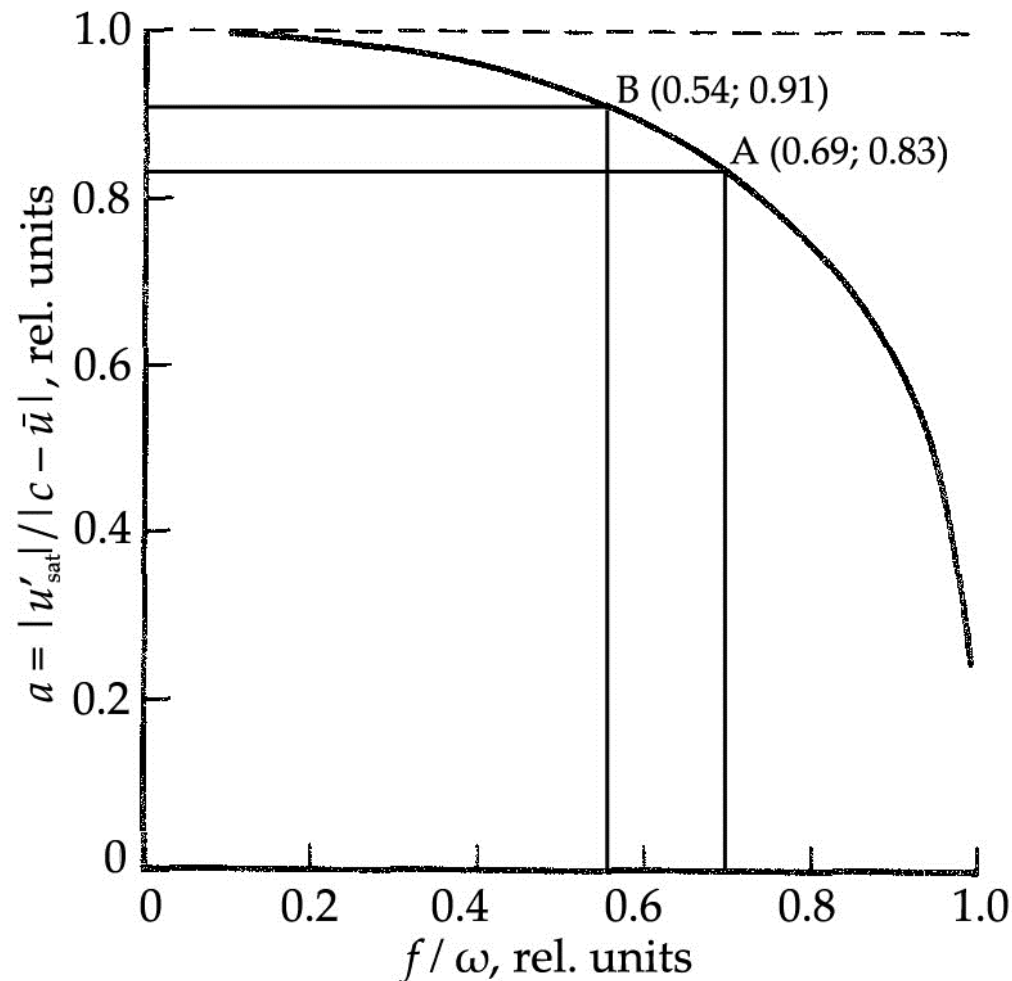
**Таблица 1 (продолжение).** Характеристики ВГВ в атмосфере Венеры, которые были получены двумя независимыми методами из радиозатменных данных о температуре для трех последовательных витков орбит 3212–3214 спутника Магеллан

Характеристики внутренней гравитационной волны	
Относительная волновая амплитуда <sup>a</sup> , $a_s \equiv  u'  /  c_{ph}^{in} $	~0.84 (наши результаты) 0.82 (вычислено для результатов статьи НЛ)
Собственная частота волны <sup>a</sup> , $\omega$	~3.9 · 10 <sup>-5</sup> рад/с (наши результаты) 2 · 10 <sup>-4</sup> рад/с (параметр $\sigma$ в статье НЛ)
Собственный период волны <sup>a</sup> , $\tau^{in} = 2\pi/\omega$	~44.8 ч ≈ 1.9 суток (наши результаты) ~9 ч (величина $2\pi/\sigma$ в статье НЛ)
Отношение $f/\omega$	~0.69 (наши результаты) ~0.14 (величина $f/\sigma$ в статье НЛ)
Собственная горизонтальная фазовая скорость <sup>a</sup> , $ c_{ph}^{in}  = \omega/ k_h $	~11.8 м/с (наши результаты) 8.5 м/с (величина $N/m$ в статье НЛ)
Горизонтальное волновое число <sup>a</sup> , $ k_h  = \omega /  c_{ph}^{in} $	~0.33 · 10 <sup>-5</sup> м <sup>-1</sup> (наши результаты) ~2.33 · 10 <sup>-5</sup> м <sup>-1</sup> (вычислено из статьи НЛ)
Горизонтальная длина волны <sup>a</sup> , $\lambda_h = 2\pi/ k_h $	~1895 км (наши результаты) 270 км (длина волны в “меридиональном” направлении в статье НЛ)
Амплитуда возмущений скорости в направлении горизонтальной составляющей вектора распространения, $ u'  = a_s \cdot  c_{ph}^{in} $	~9.9 м/с (наши результаты) 7.0 м/с (амплитуда “меридиональных” возмущений скорости в статье НЛ)
Амплитуда возмущений скорости, перпендикулярных горизонтальному вектору распространения, $ v'  = f/\omega \cdot  u' $	~6.8 м/с (наши результаты) 0.7 м/с (амплитуда “зональных” возмущений скорости в статье НЛ)
Амплитуда вертикальных возмущений скорости ветра, $ w'  = \lambda_z/\lambda_h \cdot  u' $	~1.3 · 10 <sup>-2</sup> м/с (наши результаты) 0.07 м/с (амплитуда вертикальных возмущений скорости в статье НЛ)



Выражение для определения ключевого отношения  $f/\omega$   
(Gubenko et al., 2008)

$$f/\omega = \frac{2 \cdot \sqrt{1-a}}{2-a} = \frac{2 \cdot \sqrt{1-a_e/d_e}}{2-a_e/d_e} \quad (1)$$



**Рис. 3.** Нормированная волновая амплитуда (пороговая амплитуда)  $a$ , необходимая для возникновения сдвиговой неустойчивости ветра ( $Ri < 1/4$ ), как функция отношения  $f/\omega$ . Волновая амплитуда ( $a = 1$ ), требуемая для конвективной неустойчивости показана штриховой линией (Fritts, 1989).

## Заключение:

Применение разработанного нами SWA-метода к профилям температуры, восстановленным из радиозатменных измерений спутника *Magellan*, дало возможность идентифицировать узкоспектральные волновые события в атмосфере Венеры и восстановить ключевые характеристики ВГВ, такие как: собственная частота, амплитуды вертикальных и горизонтальных возмущений скорости ветра, вертикальная и горизонтальная длины волн, собственные вертикальная и горизонтальная фазовые скорости и другие. Наблюдаемые отличия характеристик ВГВ, восстановленных двумя независимыми методами, могут быть связаны с ошибочными исходными предположениями *Hinson and Jenkins* (1995), что привело к существенным систематическим погрешностям используемого ими метода.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.*

## Литература

- Fritts D.C.* A review of gravity wave saturation processes, effects, and variability in the middle atmosphere // *Pure Appl. Geophys.* 1989. Vol. 130. P. 343–371.
- 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 // *Journal of Geophysical Research.* 2008. Vol. 113. No. D08109, doi:10.1029/2007JD008920
- Hinson, D.P., Jenkins, J.M.* Magellan radio occultation measurements of atmospheric waves on Venus // *Icarus.* 1995. V. 114. P. 310–327 (статья НЖ).

**Спасибо за внимание!**