

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

**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.

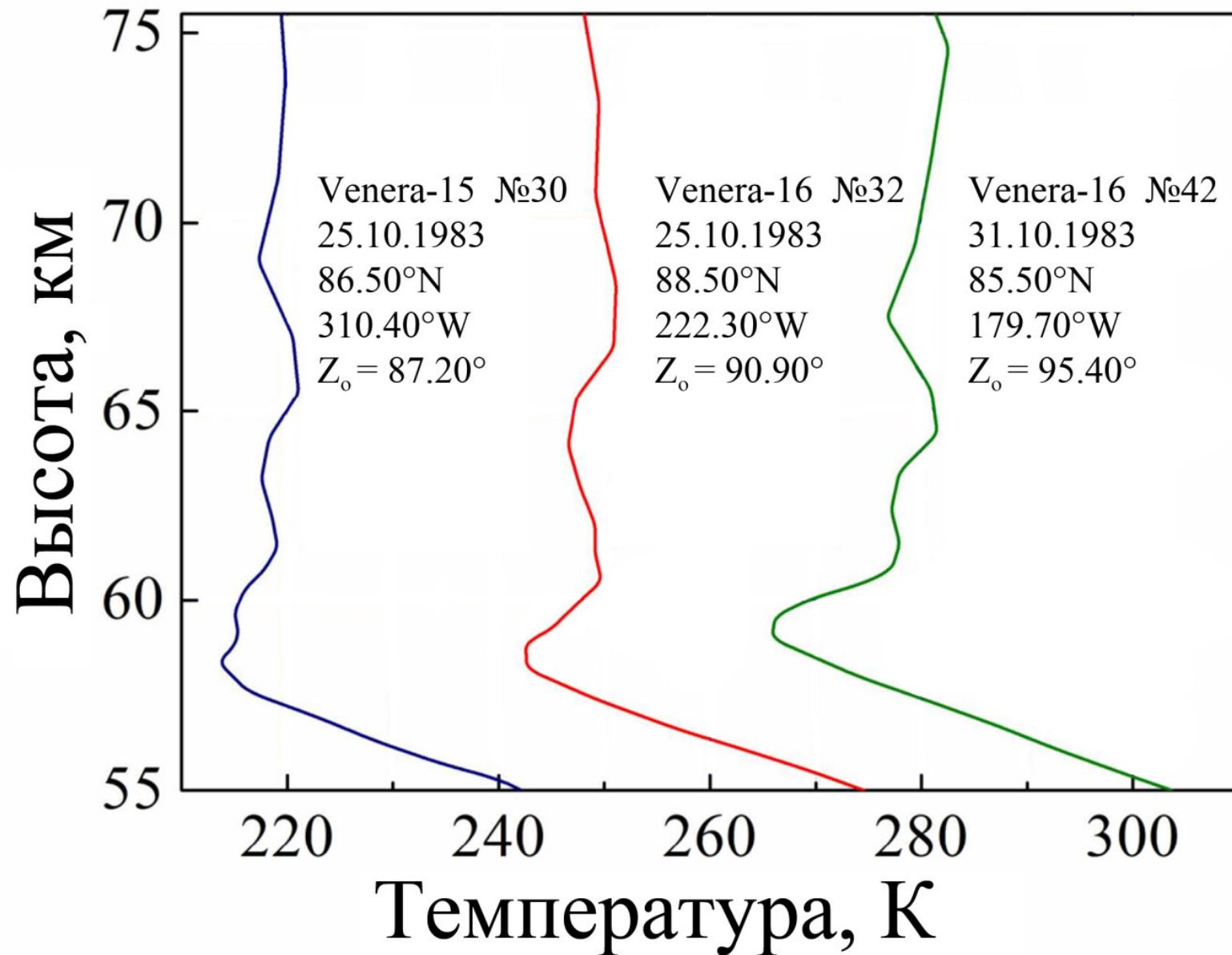


Рис. 1. Примеры волновых вариаций в полярной атмосфере Венеры, наблюдаемых в радиозатмененных профилях температуры *Венера-15* и *-16*. Профили № 30 и 42 смещены по горизонтали на ± 30 К относительно профиля № 32. Зенитные углы Солнца Z_0 , координаты и даты проведения измерений представлены на рис.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

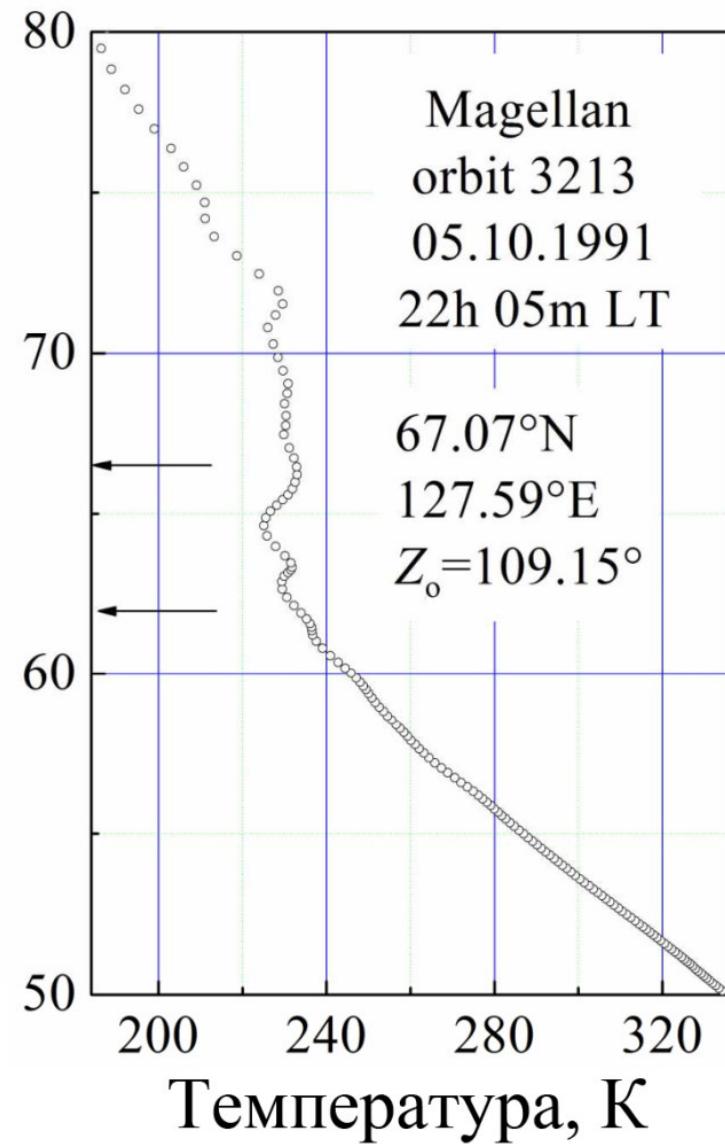
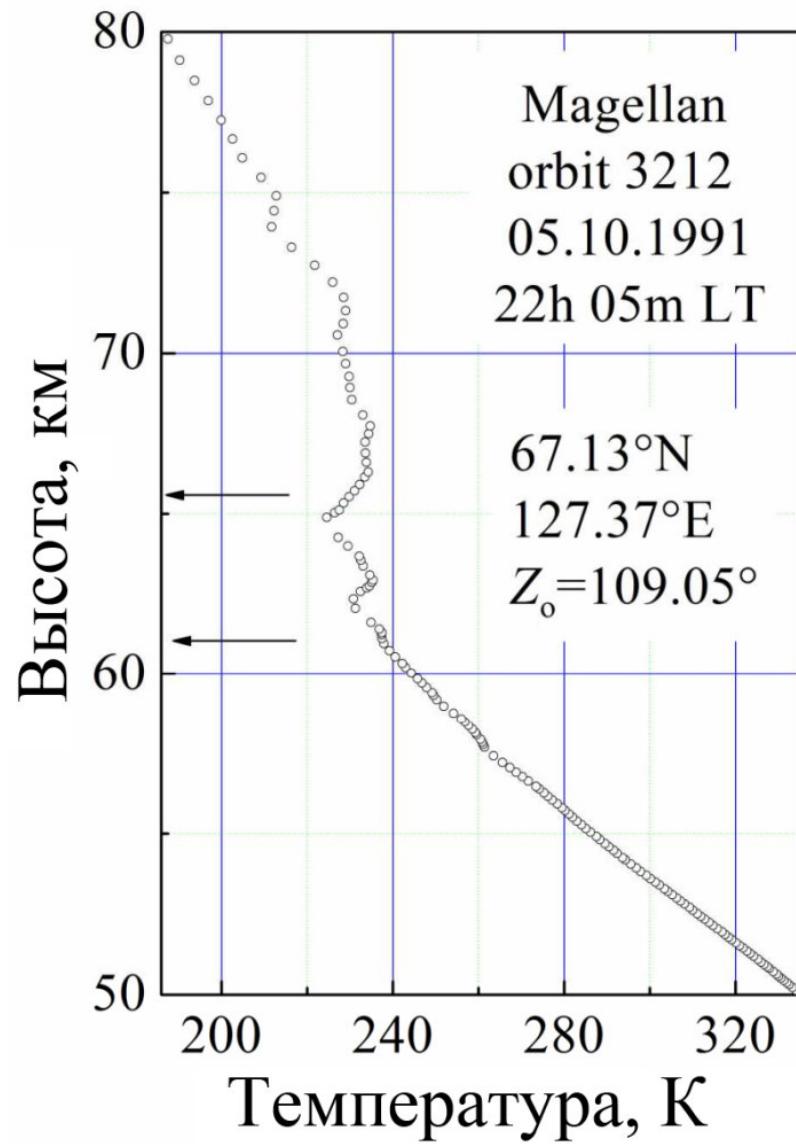


Рис. 2. Вертикальные профили температуры, восстановленные из радиозатменных измерений спутника *Magellan* для двух последовательных витков орбит – 3212 и 3213. Указаны зенитные углы Солнца Z_0 , координаты, время и дата проведения измерений. Интервалы осцилляций температуры отмечены стрелками.

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

Исходные радиозатменные данные для анализа (статья НJ)	
Зенитный угол Солнца (SZA)	109°
Местное истинное солнечное время (LTST)	22 ч 05 мин
Широта, ϕ	67°N
Долгота	127°E
Высота, h (Радиус Венеры $R_0 = 6052$ км)	≥ 57 км
Ускорение гравитации ^a , g	8.7 м/с ²
Угловая скорость вращения атмосферы, Ω	$-1.5 \cdot 10^{-5}$ 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 $	~ 64.6 ч ≈ 2.7 суток (на широте 67°N)
Невозмущенная температура ^{a,*} , T_b	~230 K
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 ⁻¹
Амплитуда возмущений температуры ^a , $ T' $	4.0 K
Нормированная амплитуда температурных возмущений ^{a,*} , $ T'/T_b $	$\sim 17.4 \cdot 10^{-3}$

^a На высоте 65 км, * вычислено нами на основе данных статьи НJ (*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 ^a , $a_s \equiv u' / c_{ph}^{in} $	~0.84 (наши результаты) 0.82 (вычислено для результатов статьи НJ)
Собственная частота волны ^a , ω	~ $3.9 \cdot 10^{-5}$ рад/с (наши результаты) ~ $2 \cdot 10^{-4}$ рад/с (параметр σ в статье НJ)
Собственный период волны ^a , $\tau^{in} = 2\pi/\omega$	~44.8 ч ≈ 1.9 суток (наши результаты) ~9 ч (величина $2\pi/\sigma$ в статье НJ)
Отношение f/ω	~0.69 (наши результаты) ~0.14 (величина f/σ в статье НJ)
Собственная горизонтальная фазовая скорость ^a , $ c_{ph}^{in} = \omega / k_h $	~11.8 м/с (наши результаты) ~8.5 м/с (величина N/m в статье НJ)
Горизонтальное волновое число ^a , $ k_h = \omega / c_{ph}^{in} $	~ $0.33 \cdot 10^{-5}$ м ⁻¹ (наши результаты) ~ $2.33 \cdot 10^{-5}$ м ⁻¹ (вычислено из статьи НJ)
Горизонтальная длина волны ^a , $\lambda_h = 2\pi/ k_h $	~1895 км (наши результаты) 270 км (длина волны в “меридиональном” направлении в статье НJ)
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 НJ)
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 НJ)
Амплитуда вертикальных возмущений скорости ветра, $ w' = \lambda_z / \lambda_h \cdot u' $	~ $1.3 \cdot 10^{-2}$ м/с (наши результаты) ~0.07 м/с (амплитуда вертикальных возмущений скорости ветра в статье НJ)

Выражение для определения ключевого отношения f/ω (Gubenko et al., 2008)

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

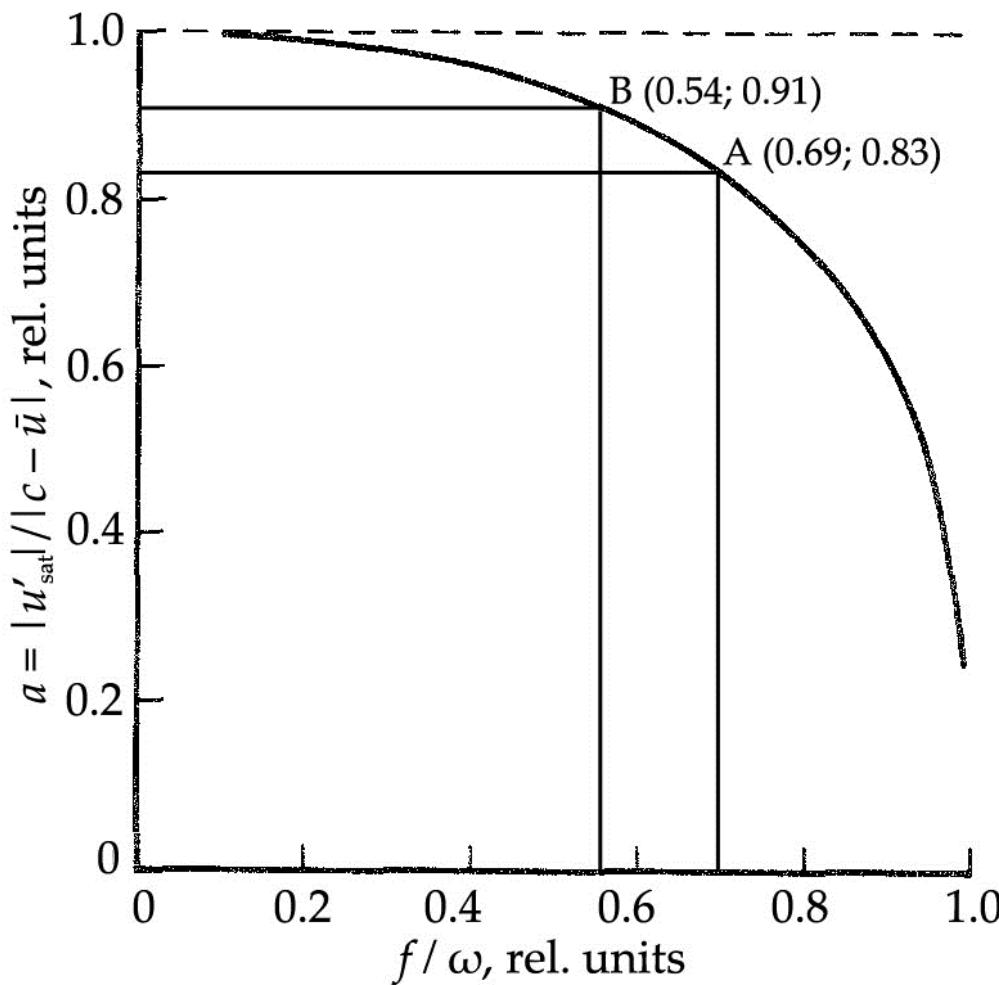


Рис. 3. Нормированная волновая амплитуда (пороговая амплитуда) a , необходимая для возникновения сдвиговой неустойчивости ветра ($Ri < 1/4$), как функция отношения f/ω . Волновая амплитуда ($a = 1$), требуемая для конвективной неустойчивости показана штриховой линией (Fritts, 1989).

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!