

Исследование внутренних волн в атмосфере Венеры по радиозатменным данным о температуре

В.Н. Губенко¹, И.А. Кириллович¹, В.Е. Андреев¹

¹Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
141190, г. Фрязино, Московская область, пл. Введенского, 1
E-mail: gubenko@fireras.su, vngubenko@gmail.com

Разработан оригинальный метод идентификации дискретных волновых событий и определения параметров внутренних гравитационных волн (ВГВ) из вертикального профиля температуры в атмосфере планеты. Этот метод не требует какой-либо дополнительной информации, не содержащейся в профиле, и может быть использован для анализа профилей измеренных различными способами. Анализируемые флуктуации температуры могут рассматриваться как обусловленные волнами в том случае, когда выполняется критерий идентификации ВГВ. Приложение разработанного метода к вертикальным профилям температуры, восстановленным из спутниковых радиозатменных измерений, дало возможность идентифицировать дискретные волновые события в атмосфере Венеры и определить значения ключевых волновых характеристик, таких как собственная частота, амплитуды вертикальных и горизонтальных возмущений скорости ветра, вертикальная и горизонтальная длины волн, собственная вертикальная и горизонтальная фазовые скорости, кинетическая и потенциальная энергия ВГВ на единицу массы. Распространение внутренних волн вызывает значительную модуляцию атмосферной стабильности, что приводит к сдвиговой неустойчивости и возникновению перемежающихся турбулентных слоев в атмосферах планет.

Ключевые слова: спутниковые радиозатменные измерения, атмосфера Венеры, профили температуры, внутренние гравитационные волны

Investigation of internal waves in the Venus's atmosphere using radio occultation temperature data

V.N. Gubenko¹, I.A. Kirillovich¹, V.E. Andreev¹

¹ Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of Russian Academy of Sciences
(Fryazino branch)

An original method for the identification of discrete wave events and determination of internal gravity wave (IGW) parameters from the vertical temperature profile in a planetary atmosphere has been developed. This method does not require any additional information not contained in the profile and may be used for the analysis of profiles measured by various techniques. The analyzed temperature fluctuations can be considered as wave-induced when the IGW identification criterion is satisfied. An application of the developed method to the vertical temperature profiles retrieved from the satellite radio occultation measurements has given the possibility to identify discrete wave events in the Venus's atmosphere and to determine the magnitudes of key wave characteristics such as the intrinsic frequency, amplitudes of vertical and horizontal perturbations of wind velocity, vertical and horizontal wavelengths, intrinsic vertical and horizontal phase speeds, kinetic and potential energy of IGWs per unit mass. Propagation of internal waves stimulates significant modulation of the atmospheric stability which leads to shear instability and emergence of intermittent turbulent layers in planetary atmospheres.

Keywords: satellite radio occultation measurements, Venus's atmosphere, temperature profiles, internal gravity waves

Введение

Волновые процессы оказывают значительное влияние на циркуляцию, химический состав, тепловой режим и изменчивость атмосфер планет земной группы. Внутренние гравитационные волны (ВГВ) — это вертикально распространяющиеся волны в атмосфере, в которых выталкивающая сила является восстанавливающей силой. Важная роль внутренних волн, в первую очередь, 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 характерной особенностью устойчиво стратифицированной атмосферы [1–3], то аналогичные эффекты можно ожидать и в атмосферах Марса и Венеры [4, 5]. Полагают, что внутренние волны могут играть более важную роль в формировании циркуляции, теплового режима и структуры атмосферы на Марсе, чем на Земле, так как во многих случаях амплитуды ВГВ в атмосфере Марса оказываются существенно больше своих земных аналогов [6]. Целью настоящей работы является демонстрация примеров практического применения разработанного ранее метода к температурным данным миссии *Magellan* в атмосфере Венеры и обсуждение полученных результатов. Этот метод является универсальным в том смысле, что его можно применять для анализа вертикальных профилей, полученных любыми способами, как в атмосфере Земли, так и в атмосферах планет земной группы.

Исходные экспериментальные данные для анализа и полученные результаты

Внутренние волны в атмосфере Венеры хорошо просматриваются в ультрафиолетовых изображениях облаков [7], в вертикальных профилях температуры [8] и ветра [9], а также в данных радиозатменных измерений [5, 10–12]. Авторы работы [11] использовали радиозатменные данные *Венера-15* и *-16* для изучения теплового режима атмосферы Венеры и показали, что на высотах более ~60 км атмосферная устойчивость велика, а вертикальные профили температуры на этих высотах демонстрируют волнообразные структуры.

На рис. 1 показаны три примера волновых вариаций в полярной атмосфере Венеры, наблюдаемых в вертикальных профилях температуры, восстановленных из радиозатменных измерений спутников *Венера-15* и *-16*. Профили температуры № 30 и 42 смещены по горизонтали на ± 30 К относительно профиля № 32. Зенитные углы Солнца Z_0 , координаты и даты проведения радиозатменных измерений указаны на рис. 1 рядом с соответствующими кривыми. Радиозатменные эксперименты *Pioneer Venus (PV)* обеспечили важные результаты о тепловой структуре нейтральной атмосферы [13], однако внутренние волны практически не изучались. Для исследования атмосферных волн спутник *Magellan* имел важные преимущества перед аппаратом *PV*. Радиосигналы с двумя длинами волн, передаваемые спутником *Magellan* на Землю, имели более высокое отношение сигнал/шум (SNR), чем их аналоги на аппарате *PV*. Период обращения спутника *Magellan* (3.26 часа в 1991 году) намного короче, чем у аппарата *PV* (24 часа), так что вращение атмосферы Венеры между последовательными затмениями пропорционально меньше. Это обеспечивает гораздо более высокое разрешение при изучении зональной структуры атмосферы [10].

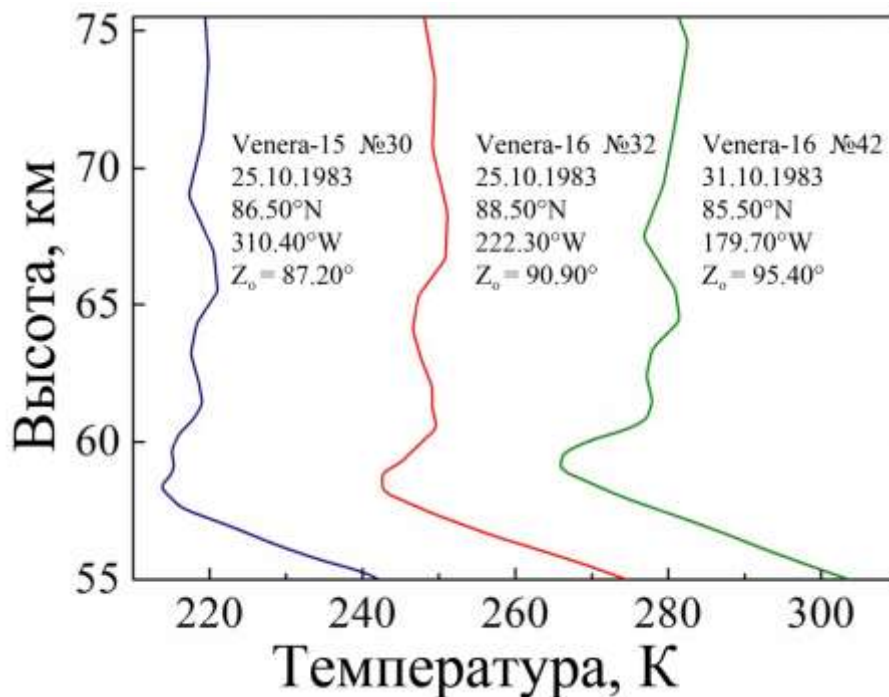


Рис. 1. Примеры волновых вариаций в полярной атмосфере Венеры, наблюдаемых в радиозатменных профилях температуры *Венера-15* и *-16*. Профили № 30 и 42 смещены по горизонтали на ± 30 К относительно профиля № 32. Зенитные углы Солнца Z_0 , координаты и даты проведения измерений показаны на рисунке.

На рис. 2 представлены вертикальные профили температуры, восстановленные из радиозатменных данных спутника *Magellan* для двух последовательных орбитальных витков 3212 и 3213. Период обращения *Magellan* 5 октября 1991 года составлял 3.26 земных часа. Зенитный угол Солнца (Z_0), координаты зондируемого района и локальное истинное солнечное время (LT) измерений указаны на рисунке. Интервалы волнообразных осцилляций температуры отмечены стрелками на рис. 2. Хинсон и Дженкинс [10] предположили, что радиационный демпинг (затухание) является основным процессом диссипации энергии внутренних волн с вертикальными длинами волн < 4 км. Это предположение было использовано ими для анализа профилей температуры и измерений интенсивности радиозатменного сигнала. Хинсон и Дженкинс [10] показали, что наблюдаемые волновые осцилляции согласуются с монохроматическими ВГВ, которые затухают с высотой за счет радиационного демпинга во время их вертикального распространения. Было установлено, что на высоте ~ 65 км амплитуда и вертикальная длина волны равны ~ 4.0 К и ~ 2.5 км, соответственно. Модель радиационного затухания предполагает, что собственная частота ВГВ составляет $\sim 2 \cdot 10^{-4}$ рад/с, а отношение горизонтальной и вертикальной длин волн равно ~ 100 [10]. Подобный подход также применялся авторами работ [12] и [14] для анализа радиозатменных данных о температуре аппарата *Venus Express* и спутниковых измерений интенсивности сигналов *Венера-15*, *-16*, соответственно.

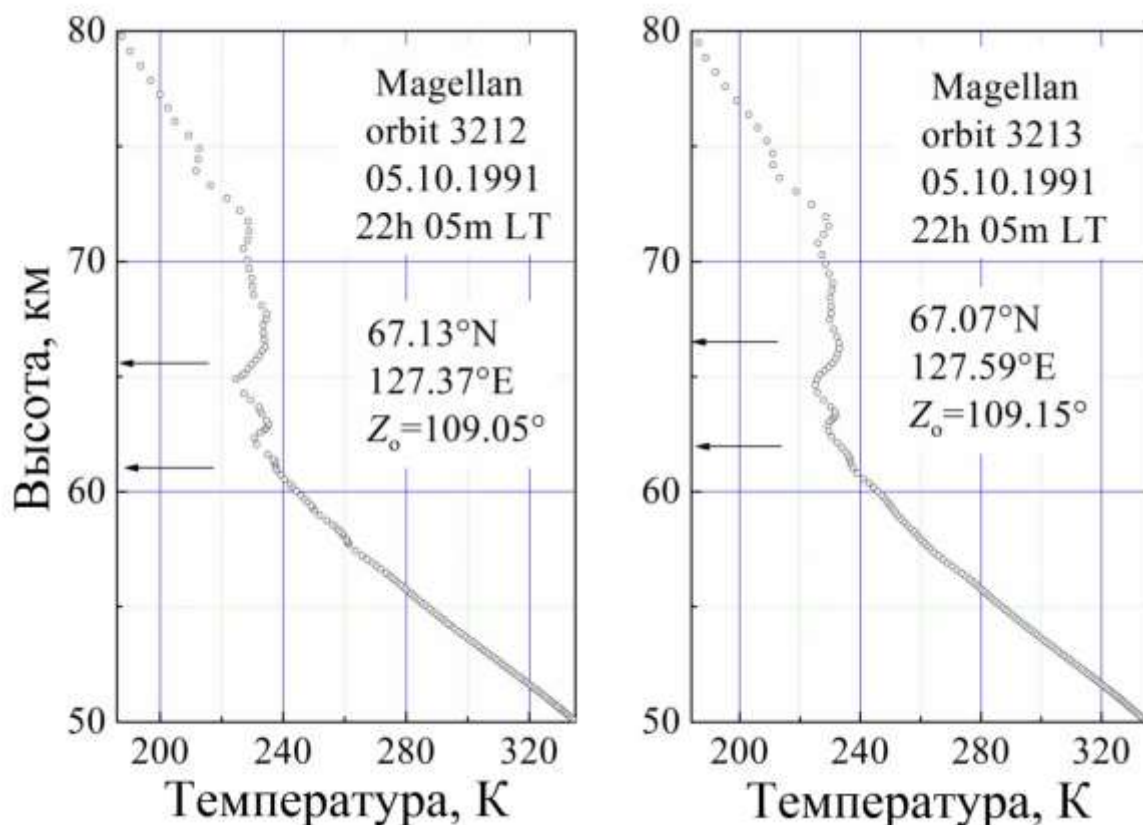


Рис. 2. Вертикальные профили температуры, восстановленные из радиозатменных измерений спутника *Magellan* для двух последовательных витков орбит – 3212 и 3213. На рисунке указаны зенитные углы Солнца Z_0 , координаты, время и дата проведения измерений

Ранее нами был разработан альтернативный метод идентификации дискретных (узкоспектральных) волновых событий и восстановления характеристик ВГВ путем использования анализа индивидуального вертикального профиля температуры, плотности или квадрата частоты Брента–Вейселя в атмосфере планеты. Также был сформулирован и обоснован пороговый дискриминационный критерий для определения дискретных волновых событий [1–4, 15, 16]. Этот SWA-метод (saturated wave assumption) использует анализ реальных амплитуд ВГВ, найденных из высотного профиля температуры или плотности, а также концепцию линейной теории волн, предполагающую ограничение амплитуды ВГВ пороговыми величинами вследствие сдвиговой (динамической) неустойчивости ветра в атмосфере планеты. Когда волновая амплитуда достигает порога динамической неустойчивости по мере распространения волны вверх, возникают турбулентность и диссипация энергии ВГВ, при этом амплитуда волны остается на уровне порога неустойчивости. В этом случае имеет место ситуация насыщения амплитуды внутренней волны. Применение этого метода для анализа радиозатменных данных о температуре дало возможность обнаружить ВГВ в атмосферах Земли и Марса, а также найти ключевые параметры идентифицируемых волн, включая собственную частоту, вертикальные потоки волновой энергии и горизонтального импульса [1–4]. Данные численного моделирования и анализ независимых радарных и радиозондовых измерений в атмосфере Земли показали высокую эффективность разработанного нами метода и достоверность полученных результатов на его основе [17].

В качестве исходных данных для повторного анализа внутренних волн в атмосфере Венеры мы использовали профили вариаций температуры для длин волн < 4 км, найденные Хинсоном и Дженкинсом [10] после высокочастотной фильтрации. Анализируемые данные о температуре были получены из измерений *Magellan* 5–6 октября 1991 года на трех последовательных витках орбит 3212–3214.

Анализ радиозатменных данных *Magellan* о температуре SWA-методом и обсуждение полученных результатов

Оценка собственной частоты волны Хинсона и Дженкинса [10] основана на предположении, что наблюдаемое ослабление волновой амплитуды на высотах более ~65 км обусловлено радиационным демпингом. С этой целью они анализировали ослабление температурных осцилляций для трех радиозатменных профилей спутника *Magellan* в высотном интервале от ~65 км до ~90 км.

Наш SWA-метод использует характеристики локальной аномалии температуры на высоте ~65 км, обусловленной монохроматической ВГВ. Указанными характеристиками являются: амплитуда возмущений температуры $|T'| = 4.0$ К, их вертикальная длина волны $|\lambda_z| = 2\pi/|m| = 2.5$ км, фоновая абсолютная температура $T_b = 230$ К, нормированная амплитуда $|\hat{T}'| = |T'/T_b| = 17 \cdot 10^{-3}$ температурных возмущений и фоновая частота Брента-Вяйсяля $N_b = 0.021$ рад/с. Эти величины были определены Хинсоном и Дженкинсом [10] и они представлены в верхней части таблицы 1 в качестве исходных данных для нашего анализа. Используя указанные выше величины и уравнение (12) работы [1], мы восстановили значения относительной волновой амплитуды a_e и других характеристик ВГВ. Таким образом, для получения локальных оценок нам не требуется анализ флуктуаций температуры в полном высотном диапазоне 65–90 км.

Используя уравнение (12) работы [1] и указанные данные о вертикальной длине волны, фоновой частоте плавучести, ускорении свободного падения, нормированной амплитуде температурных возмущений, мы определили относительную амплитуду волны $a_e = 0.83$. Эта величина удовлетворяет критерию идентификации ВГВ $a_e \leq 1$, поэтому волнообразные осцилляции температуры в радиозатменных данных *Magellan* можно рассматривать как индуцированные волной. Основываясь на результатах НЖ-статьи [10] об амплитуде $|u'|$ и собственной горизонтальной фазовой скорости, мы также вычислили относительную волновую амплитуду ~0,82. Ключевой параметр f/ω определялся с помощью следующего уравнения:

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

Полагая, что степень насыщения волны равна $d_e = 1 = 100\%$ (предположение о насыщении волны), из соотношения (1) находим, что отношение f/ω равно ~0.69. Используя значение $|f| = 2.7 \cdot 10^{-5}$ рад/с на широте 67°N, мы определили собственную частоту $\omega = 3.9 \cdot 10^{-5}$ рад/с и период волны $\tau^{\text{in}} = 44.8$ часа = 1.9 дня. Последнее значение в ~5 раз больше, чем период волны ~9 часов, приведенный в работе [10]. В таблице 1 представлены все характеристики ВГВ, которые были вычислены нами по температурным данным спутника *Magellan* с использованием SWA-метода.

Сравнение наших результатов с данными, полученными в работе [10], демонстрирует существенные различия. Наша оценка собственной горизонтальной фазовой скорости (~11.8 м/с) и амплитуды возмущений скорости $|u'|$ (~9.9 м/с) в 1.4 раза больше соответствующих оценок ~8.5 м/с и ~7.0 м/с, полученных в [10]. Мы видим, что оценки $|c_{\text{ph}}^{\text{in}}|$ и $|u'|$ полученные двумя независимыми методами, отличаются друг от друга на ~28% и ~29%, соответственно. Значение горизонтальной длины волны, полученное SWA-методом (~1895 км), примерно в 7 раз превышает соответствующее значение ~270 км, найденное Хинсоном и Дженкинсом [10]. Одной из причин наблюдаемых различий являются погрешности используемых методов. Хинсон и Дженкинс [10] заявляют, что возможная погрешность их метода составляет ~50% [10, стр. 322]. Принимая во внимание результаты, полученные в работах [18–20], мы

полагаем, что следующие два предположения, приведенные в НЖ-статье [10] (стр. 319, левая колонка), могут быть причиной значительных систематических погрешностей:

1. “Волновая амплитуда недостаточна, чтобы вызвать конвективную неустойчивость, которая является альтернативным механизмом затухания”.

2. “Аналогично, сдвиговая неустойчивость ветра вряд ли может быть причиной наблюдаемого затухания, поскольку волновая амплитуда, по-видимому, также недостаточна для запуска указанного эффекта”.

Кроме того, авторы НЖ-статьи [10, стр. 320, правая колонка] использовали упрощенное дисперсионное соотношение для ВГВ с промежуточными собственными частотами $N_b \gg \omega \gg f$, в котором заранее исключаются низкочастотные внутренние волны.

Для анализа радиозатменных данных о температуре *Magellan*, мы используем SWA-метод и предположение о насыщении ВГВ. Иногда это предположение не выполняется, что приводит к некоторым систематическим ошибкам при применении SWA-метода и искажению восстанавливаемых волновых характеристик [16].

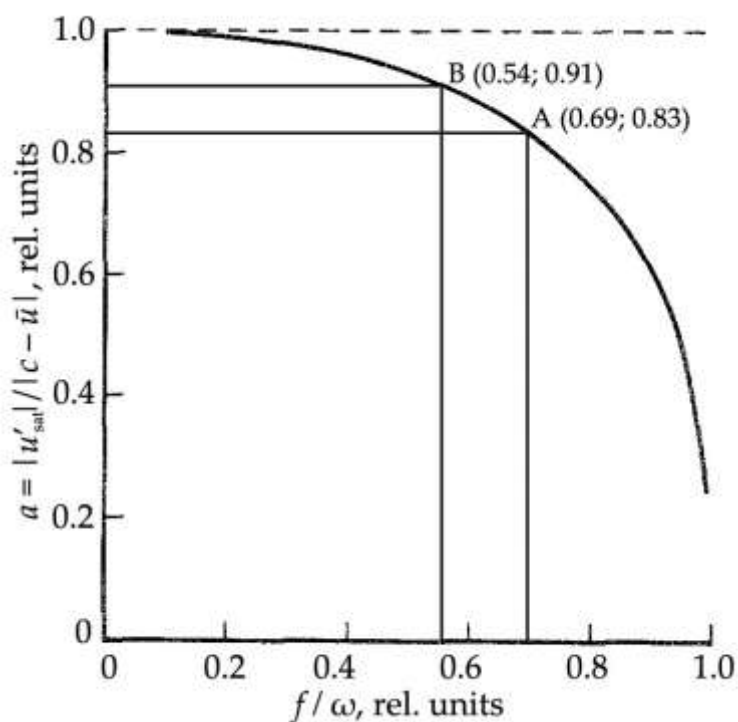


Рис. 3. Нормированная волновая амплитуда (пороговая амплитуда) a , необходимая для возникновения сдвиговой неустойчивости ветра ($Ri < 1/4$), как функция отношения f/ω . Волновая амплитуда ($a = 1$), требуемая для конвективной неустойчивости показана штриховой линией [18].

Рассмотрим оценки погрешности, связанные с тем, что точное значение a может отличаться от a_e . Будем считать полностью насыщенную волну $a_e = a = 0.83$, но в общем случае пороговая амплитуда a может быть произвольной, подчиняясь неравенству $1 \geq a \geq a_e$. Так, возможные значения степени насыщения находятся в интервале $1 \geq d_e \geq a_e$, или $83\% \leq d_e \leq 100\%$. Одновременные радиозондовые исследования температуры и скорости ветра показывают, что в большинстве случаев наблюдаются насыщенные ВГВ; однако иногда возможны и исключения [16]. Мы принимаем разумное отклонение $\sim 10\%$ для значений a_e и a . Точки А и В на рис. 3 обозначают полученные нами результаты и

отклонение 10%: А ($f/\omega = 0.69$; $a_e = 0.83$) и В ($f/\omega = 0.54$; $a = 0.91$). Значение $f/\omega = 0.54$ было рассчитано с помощью уравнения (12) работы [1] используя $a = 0.91$. Мы видим, что относительная неопределенность для f/ω равна ~22%. Нами были найдены и другие характеристики внутренних волн для данного случая В. Их величины составляют: $\omega = 5.0 \cdot 10^{-5}$ рад/с (~28%); $\tau^{\text{in}} = 34.9$ ч (~22%); $|c_{\text{ph}}^{\text{in}}| = 9.9$ м/с (~16%); $|k_h| = 0.50 \cdot 10^{-5}$ м⁻¹ (~52%); $\lambda_h = 1260$ км (~34%); $|u'| = 9.0$ м/с (~9%); $|v'| = 4.9$ м/с (~28%); $|w'| = 1.8 \cdot 10^{-2}$ м/с (~39%). В скобках указаны относительные ошибки для этих параметров. Таким образом, отклонение значений a_e и a на ~10% приводит к относительным погрешностям восстановленных характеристик ВГВ от ~9% до ~52%.

Заключение

Таким образом, различия характеристик ВГВ, восстановленных двумя независимыми методами, могут быть связаны с ошибочными предположениями в работе [10], а также со значительными систематическими погрешностями используемых методов. Данные, полученные в работе [10] могут свидетельствовать о том, что анализируемая волна является ненасыщенной. Значения пороговой амплитуды a и степени насыщения d , рассчитанные на основе данных [10], составляют ~0.99 и ~83% соответственно. Если погрешности метода в работе [10] позволяют считать указанные оценки достоверными, то предположение о насыщении амплитуды ВГВ может не выполняться. В этом случае, поправка ($d_e = 0.83 = 83\%$) в выражении (1) позволяет согласовать результаты, полученные двумя независимыми методами.

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

Литература

1. 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, <https://doi.org/10.1029/2007JD008920>.
2. 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, <https://doi.org/10.5194/amt-4-2153-2011>.
3. 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, <https://doi.org/10.1134/S0010952512010029>.
4. 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, <https://doi.org/10.1134/S0010952515020021>.
5. 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, <https://doi.org/10.1029/2007JE002940>.
6. Fritts D.C., Wang L., Tolson R.H. Mean and gravity wave structures and variability in the Mars upper atmosphere inferred from Mars Global Surveyor and Mars Odyssey aerobraking densities // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. No. A12304, <https://doi.org/10.1029/2006JA011897>.

7. Rossow, W.B., Del Genio, A.D., Limaye, S.S., Travis, L.D., Stone, P.H. Cloud morphology and motions from Pioneer Venus images // *J. Geophys. Res.* 1980. V. 85. P. 8107–8128.
8. Seiff, A., Kirk, D.B., Young, R.E., Blanchard, R.C., Findlay, J.T., Kelley, G.M., Summer, S.C. Measurements of thermal structure and thermal contrasts in the atmosphere of Venus and related dynamical observations: Results from the four Pioneer Venus probes // *J. Geophys. Res.* 1980. V. 85. P. 7903–7933.
9. Counselman, C.C. III, Gourevitch, S.A., King, R.W., Lorient, G.B. Zonal and meridional circulation of the lower atmosphere of Venus determined by radio interferometry // *J. Geophys. Res.* 1980. V. 85. P. 8026–8030.
10. Hinson, D.P., Jenkins, J.M. Magellan radio occultation measurements of atmospheric waves on Venus // *Icarus*. 1995. V. 114. P. 310–327.
11. 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. P. 493–510, [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(91\)90243-M](https://doi.org/10.1016/0019-1035(91)90243-M).
12. 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.
13. Kliore, A.J., Patel, I.R. Vertical structure of the atmosphere of Venus from Pioneer Venus Orbiter radio occultations // *J. Geophys. Res.* 1980. V. 85. P. 7957–7962.
14. Gubenko, V.N., Kirillovich, I.A., Gubenko, D.V., Andreev, V.E., Gubenko, T.V. Activity of small-scale internal waves in the northern polar atmosphere of Venus by radio occultation measurements of signal intensity ($\lambda = 32$ cm) from Venera-15 and -16 satellites // *Solar System Research*. 2021. V. 55. P. 3–12, <https://doi.org/10.1134/S0038094621010044>.
15. 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. P. 1702–1716, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.10.001>.
16. 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. P. 41–48, <https://doi.org/10.12737/stp-42201807>.
17. Rechou, A., Kirkwood, S., Arnault, J., Dalin, P. Short vertical-wavelength inertia gravity waves generated by a jet-front system at Arctic latitudes — VHF radar, radiosondes, and numerical modeling // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. V. 14. P. 6785–6799, <https://doi.org/10.5194/acp-14-6785-2014>.
18. Fritts, D.C. A review of gravity wave saturation processes, effects, and variability in the middle atmosphere // *Pure Appl. Geophys.* 1989. V. 130. P. 343–371.
19. Fritts, D.C., Rastogi, P.K. Convective and dynamical instabilities due to gravity motions in the lower and middle atmosphere: Theory and observations // *Radio Sci.* 1985. V. 20. P. 1247–1277.
20. Dunkerton, T.J. Inertia-gravity waves in the stratosphere // *J. Atmos. Sci.* 1984. V. 41. P. 3396–3404.

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 НЖ) | |
|---|---|
| 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 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 ⁻¹ |
| Амплитуда возмущений температуры $^a, T' $ | 4.0 К |
| Нормированная амплитуда температурных возмущений $^{a,*}, T'/T_b $ | $\sim 17.4 \cdot 10^{-3}$ |
| Характеристики внутренней гравитационной волны | |
| Относительная волновая амплитуда a , $a_e \equiv u' / c_{ph}^{in} $ | ~ 0.84 (наши результаты) 0.82 (вычислено для результатов статьи НЖ) |
| Собственная частота волны $^a, \omega$ | $\sim 3.9 \cdot 10^{-5}$ рад/с (наши результаты) $2 \cdot 10^{-4}$ рад/с (параметр σ в статье НЖ) |
| 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 НЖ) |
| Отношение f/ω | ~ 0.69 (наши результаты) ~ 0.14 (величина f/σ в статье НЖ) |
| 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 НЖ) |
| Горизонтальное волновое число a , $ k_h = \omega / c_{ph}^{in} $ | $\sim 0.33 \cdot 10^{-5}$ м ⁻¹ (наши результаты) $\sim 2.33 \cdot 10^{-5}$ м ⁻¹ (вычислено из статьи НЖ) |
| Горизонтальная длина волны $^a, \lambda_h = 2\pi/ k_h $ | ~ 1895 км (наши результаты) 270 км (длина волны в “меридиональном” направлении в статье НЖ) |
| Амплитуда возмущений скорости в направлении горизонтальной составляющей вектора распространения, $ u' = a_e \cdot c_{ph}^{in} $ | ~ 9.9 м/с (наши результаты) 7.0 м/с (амплитуда “меридиональных” возмущений скорости в статье НЖ) |
| 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 НЖ) |
| Амплитуда вертикальных возмущений скорости ветра, $ w' = \lambda_z/\lambda_h \cdot u' $ | $\sim 1.3 \cdot 10^{-2}$ м/с (наши результаты) 0.07 м/с (амплитуда вертикальных возмущений скорости в статье НЖ) |

^a На высоте 65 км, * вычислено нами на основе данных статьи НЖ