

Характеристики внутренних волн в атмосфере Венеры, полученные на основе анализа радиозатменных измерений спутника Magellan

В.Н. Губенко¹, И.А. Кириллович¹, Т.В. Губенко¹, В.Е. Андреев¹, А.А. Павельев¹

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

Мы разработали оригинальный метод идентификации дискретных волновых событий и восстановления характеристик внутренних гравитационных волн (ВГВ), используя анализ индивидуального высотного профиля температуры, плотности или квадрата частоты Брента-Вайсяля в атмосфере планет земной группы. Радиационное затухание в атмосфере Венеры на высотах более ~65 км является основным процессом диссипации внутренних волн с вертикальной длиной волны <4 км, и этот подход был ранее использован Хинсоном и Дженкинсом для волнового анализа радиозатменных данных Magellan о температуре и интенсивности сигнала. 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 после высокочастотной фильтрации. Анализируемые данные о температуре были получены из измерений Magellan 5–6 октября 1991 года на трех последовательных витках (номера орбит 3212–3214). В работе проведен анализ и сравнение результатов, полученных двумя независимыми методами.

Ключевые слова: радиозатменные измерения, спутник Magellan, атмосфера Венеры, вертикальные профили температуры, внутренние гравитационные волны

Characteristics of internal waves in the Venus's atmosphere obtained from the analysis of radio occultation measurements of the Magellan spacecraft

V.N. Gubenko¹, I.A. Kirillovich¹, T.V. Gubenko¹, V.E. Andreev¹, A.A. Pavelyev¹

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

We developed an original method for identifying discrete wave events and reconstructing the characteristics of internal gravity waves (IGWs) using the analysis of an individual altitude profile of temperature, density, or Brunt-Vaisala frequency squared in the atmosphere of terrestrial planets. Radiative attenuation in the atmosphere of Venus above ~65 km is the main dissipation process for internal waves with vertical wavelength <4 km, and this approach was previously used by Hinson and Jenkins for wave analysis of Magellan radio occultation temperature and signal intensity data. As initial data for the reanalysis of internal waves in the atmosphere of Venus, we used the profiles of temperature variations for wavelengths <4 km found by Hinson and Jenkins after high-frequency filtering. The analyzed temperature data were obtained from Magellan measurements on October 5–6, 1991 on three successive orbits (orbit numbers 3212–3214). The paper analyzes and compares the results obtained by two independent methods.

Keywords: radio occultation measurements, Magellan spacecraft, atmosphere of Venus, vertical profiles of temperature, internal gravity waves

Введение

Внутренние гравитационные волны (ВГВ) — это вертикально распространяющиеся волны в атмосфере, в которых выталкивающая сила является восстанавливающей силой. Внутренние волны могут генерироваться вертикальным смещением атмосферы

вследствие потоков над топографией, конвекцией или сдвиговой неустойчивостью фонового ветра. Внутренние волны в атмосфере Венеры хорошо просматриваются в ультрафиолетовых изображениях облаков [1], в вертикальных профилях температуры [2] и ветра [3], а также в данных радиозатменных измерений [4–7]. Авторы работы [5] 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. Радиозатменные эксперименты Pioneer Venus (PV) обеспечили важные результаты о тепловой структуре нейтральной атмосферы [8], 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 [4]. Хинсон и Дженкинс [4] 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 [4] показали, что наблюдаемые волновые осцилляции согласуются с монохроматическими ВГВ, которые затухают за счет радиационного демпинга во время их вертикального распространения. Было установлено, что на высоте ~65 км вертикальная длина волны и ее амплитуда равны ~2.5 км и ~4 К, 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 [4]. Подобный подход также применялся авторами работ [7] и [9] для анализа температурных данных аппарата Venus Express и радиозатменных спутниковых измерений интенсивности сигналов Венера-15, -16, соответственно.

Нами разработан альтернативный метод идентификации дискретных (узкоспектральных) волновых событий и восстановления характеристик ВГВ путем использования анализа индивидуального вертикального профиля температуры, плотности или квадрата частоты Брента–Вяйсяля в атмосфере планеты. Сформулирован и обоснован пороговый дискриминационный критерий для определения дискретных волновых событий [10–15]. 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 [10–13]. Данные численного моделирования и анализ независимых радарных и радиозондовых измерений в атмосфере Земли показали

высокую эффективность разработанного нами метода и высокую достоверность полученных результатов на его основе [16].

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 после высокочастотной фильтрации. Анализируемые данные о температуре были получены из измерений Magellan 5–6 октября 1991 года на трех последовательных витках (номера орбит 3212–3214). В работе проведен анализ и сравнение результатов, полученных двумя независимыми методами.

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

Оценка собственной частоты волны Хинсона и Дженкинса [4] основана на предположении, что наблюдаемое ослабление волновой амплитуды на высотах более ~65 км обусловлено радиационным демпингом. С этой целью они анализировали ослабление температурных осцилляций в трех профилях Magellan в высотном интервале от ~65 до ~90 км.

Наш SWA-метод использует только характеристики локальной аномалии температуры на высоте ~65 км, связанной с монохроматической ВГВ. Данными характеристиками являются: амплитуда возмущений температуры $|T'| = 4$ 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 [4] и они представлены в верхней части таблицы 1 в качестве исходных данных для нашего анализа. Используя указанные выше величины и уравнение (12) работы [10], мы восстановили значения относительной волновой амплитуды a_e и других характеристик ВГВ. Таким образом, для получения наших локальных оценок не требуется анализ флуктуаций температуры в полном высотном диапазоне 65–90 км.

Используя уравнение (12) работы [10] 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 [4] 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 (1) находим, что отношение f/ω равно ~0.69. Используя значение $|f| = 2.7 \cdot 10^{-5}$ рад/с на 67°N, мы определили собственную частоту $\omega = 3.9 \cdot 10^{-5}$ рад/с и период волны $\tau^{\text{ин}} = 44.8$ часа = 1.9 дня. Последнее значение в ~5 раз больше, чем период волны ~9 часов, приведенный в работе [4]. 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 [4], 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 [4]. Мы видим, что оценки $|c_{ph}^{in}|$ и $|u'|$ полученные двумя независимыми методами, отличаются друг от друга на $\sim 28\%$ и $\sim 29\%$, соответственно. Значение горизонтальной длины волны, полученное SWA-методом (~ 1895 км), примерно в 7 раз превышает соответствующее значение ~ 270 км, найденное Хинсоном и Дженкинсом [4]. Одной из причин наблюдаемых различий являются погрешности используемых методов. Хинсон и Дженкинс [4] заявляют, что возможная погрешность их метода составляет $\sim 50\%$ [4, стр. 322]. Принимая во внимание результаты, полученные в работах [17–19], мы полагаем, что следующие два предположения, приведенные в НД-статье [4] (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 НД-статьи [4, 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 [15].

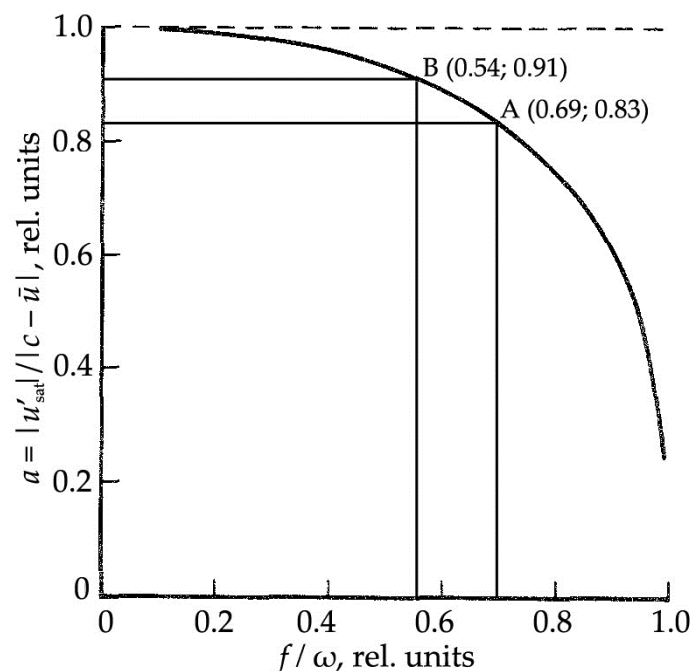


Рис. 1. Нормированная волновая амплитуда (пороговая амплитуда) a , необходимая для возникновения сдвиговой неустойчивости ветра ($Ri < 1/4$), как функция отношения f/ω .

Волновая амплитуда ($a = 1$), требуемая для конвективной неустойчивости показана штриховой линией [17].

Таблица 1. Характеристики внутренних гравитационных волн в атмосфере Венеры, которые были получены двумя независимыми методами из радиозатменных данных о температуре, собранных 5–6 октября 1991 года, во время выполнения трех последовательных витков (орбитальные номера 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 , ω	$\sim 3.9 \cdot 10^{-5}$ 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

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 возможны и исключения [15]. Мы принимаем разумное отклонение $\sim 10\%$ для значений a_e и a . Точки А и В на рис. 1 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) со значением $a = 0.91$. Итак, мы видим, что относительная неопределенность для f/ω равна $\sim 22\%$. Нами были найдены и другие характеристики внутренних волн для данного случая В. Их величины составляют: $\omega = 5.0 \cdot 10^{-5}$ рад/с ($\sim 28\%$); $\tau^{\text{in}} = 34.9$ ч ($\sim 22\%$); $|c_{\text{ph}}^{\text{in}}| = 9.9$ м/с ($\sim 16\%$); $|k_{\text{h}}| = 0.50 \cdot 10^{-5}$ м $^{-1}$ ($\sim 52\%$); $\lambda_{\text{h}} = 1260$ км ($\sim 34\%$); $|u'| = 9.0$ м/с ($\sim 9\%$); $|v'| = 4.9$ м/с ($\sim 28\%$); $|w'| = 1.8 \cdot 10^{-2}$ м/с ($\sim 39\%$). В скобках указаны относительные ошибки для этих параметров. Мы видим, что отклонение значений a_e и a на $\sim 10\%$ приводит к относительным погрешностям восстановленных характеристик ВГВ от $\sim 9\%$ до $\sim 52\%$.

Таким образом, наблюдаемые большие различия между параметрами волн, восстановленными двумя независимыми методами, могут быть связаны с ошибочными предположениями и значительными систематическими погрешностями используемых методов. Существует простое возможное объяснение, позволяющее согласовать результаты, полученные двумя независимыми методами. Данные, полученные в работе [4], могут свидетельствовать о том, что анализируемая внутренняя волна является ненасыщенной. Значения пороговой амплитуды a и степени насыщения d , рассчитанные на основе данных [4], составляют ~ 0.99 и $\sim 83\%$ соответственно. Если погрешности метода позволяют считать эти оценки достоверными, то предположение о насыщении амплитуды внутренней волны может не выполняться. В этом случае поправка ($d_e = 0.83 = 83\%$) в выражении (12) позволяет согласовать результаты, полученные двумя независимыми методами.

Работа выполнена в рамках государственного задания.

Литература

1. 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, 85, 8107–8128.
2. 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, 85, 7903–7933.
3. 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, 85, 8026–8030.
4. Hinson, D.P., Jenkins, J.M. Magellan radio occultation measurements of atmospheric waves on Venus. Icarus. 1995, 114, 310–327.
5. 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, 94, 493–510, doi: 10.1016/0019-1035(91)90243-M.

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, 113, E03001, doi: 10.1029/2007JE002940.
7. 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, 221, 471–480.
8. Kliore, A.J., Patel, I.R. Vertical structure of the atmosphere of Venus from Pioneer Venus Orbiter radio occultations. *J. Geophys. Res.* 1980, 85, 7957–7962.
9. 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, 55, 3–12, doi: 10.1134/S0038094621010044.
10. 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, 113, D08109, doi: 10.1029/2007JD008920.
11. 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, 4, 2153–2162, doi: 10.5194/amt-4-2153-2011.
12. 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, 50, 21–31, doi: 10.1134/S0010952512010029.
13. 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, 53, 133–142, doi: 10.1134/S0010952515020021.
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, 61, 1702–1716, doi: 10.1016/j.asr.2017.10.001.
15. 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, 4, 41–48, doi: 10.12737/stp-42201807.
16. 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, 14, 6785–6799, doi: 10.5194/acp-14-6785-2014.
17. Fritts, D.C. A review of gravity wave saturation processes, effects, and variability in the middle atmosphere. *Pure Appl. Geophys.* 1989, 130, 343–371.
18. 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, 20, 1247–1277.
19. Dunkerton, T.J. Inertia-gravity waves in the stratosphere. *J. Atmos. Sci.* 1984, 41, 3396–3404.