

Определение ключевых характеристик внутренних волн в атмосфере Земли на основе усовершенствованного метода анализа годографа скорости ветра в зондовых измерениях

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

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

Гипотеза о насыщении внутренних гравитационных волн (ВГВ) играет ключевую роль при радиозатменном мониторинге волновых явлений в атмосферах Земли и планет. По этой причине изучение процессов насыщения внутренних волн на основе данных зондов в атмосфере Земли является актуальной и важной задачей. В работе представлены результаты определения реальных и пороговых амплитуд, степени насыщения и других характеристик для идентифицированных ВГВ в атмосфере Земли, полученные из радиозондовых измерений SPARC (Stratospheric Processes And their Role in Climate) с помощью усовершенствованного метода анализа годографа скорости ветра.

Hypothesis of internal gravity wave (IGW) saturation plays a key role in radio occultation monitoring of wave phenomena in atmospheres of the Earth and planets. A sonde study of wave saturation processes in Earth's atmosphere is therefore the actual and important task. We report the results of determination of actual and threshold amplitudes, saturation degree, and other characteristics for identified IGWs in the Earth's atmosphere obtained from radiosonde measurements SPARC (Stratospheric Processes And their Role in Climate) with aid of the upgraded method of wind speed hodograph analysis.

Анализ радиозондовых измерений с помощью усовершенствованного метода годографа скорости ветра и обсуждение полученных результатов

Для демонстрации возможностей разработанного нами усовершенствованного метода годографа скорости ветра [1], рассмотрим пример его практического применения к анализу одновременных зондовых измерений температуры и скорости ветра в атмосфере Земли. Данные об этих измерениях находятся в свободном доступе на сайте Центра данных SPARC (Stratospheric Processes And their Role in Climate). Регистрация измерений проводилась с интервалами 6 сек, что соответствует вертикальному разрешению данных ~ 30 м при средней скорости подъема аэростата ~ 5 м/с. Точность измерений температуры и скорости ветра составляют ~ 0.2 К и ~ 1 м/с, соответственно.

На рис. 1 представлены два профиля температуры, полученные по данным измерений в атмосфере Земли над пустынным районом Desert Rock, которые проводились с интервалом ~ 12 часов. Высотная корреляция квазипериодических вариаций температуры для указанных профилей в выделенном интервале предполагает, что эти вариации могут быть обусловлены внутренней гравитационной волной (ВГВ) или полусуточным тепловым приливом с периодом ~ 12 часов в системе отсчета земного наблюдателя. Для проверки указанного предположения мы провели совместный анализ данных о температуре (рис. 1, слева), зональной и меридиональной скорости ветра (рис. 1, справа) для сеанса измерений 06.11.2008 года. Зональным принято считать направление с запада на восток, а меридиональным – с юга на север.

На рис. 2 показаны анализируемые профили для выделенного нами интервала 22.5–30.0 км волновых проявлений в атмосфере. Пунктиром показаны соответствующие средние (невозмущенные) профили, вычисленные на основе аппроксимации исходных данных полиномом 3-й степени методом наименьших квадратов (МНК). Применяв выражение (5) работы [1] к среднему профилю температуры, мы получили оценку невозмущенной частоты Брента–Вяйсяля $N_b \simeq 2.18 \cdot 10^{-2}$ рад/с (параметр стабильности атмосферной стратификации) для анализируемого интервала в атмосфере планеты.

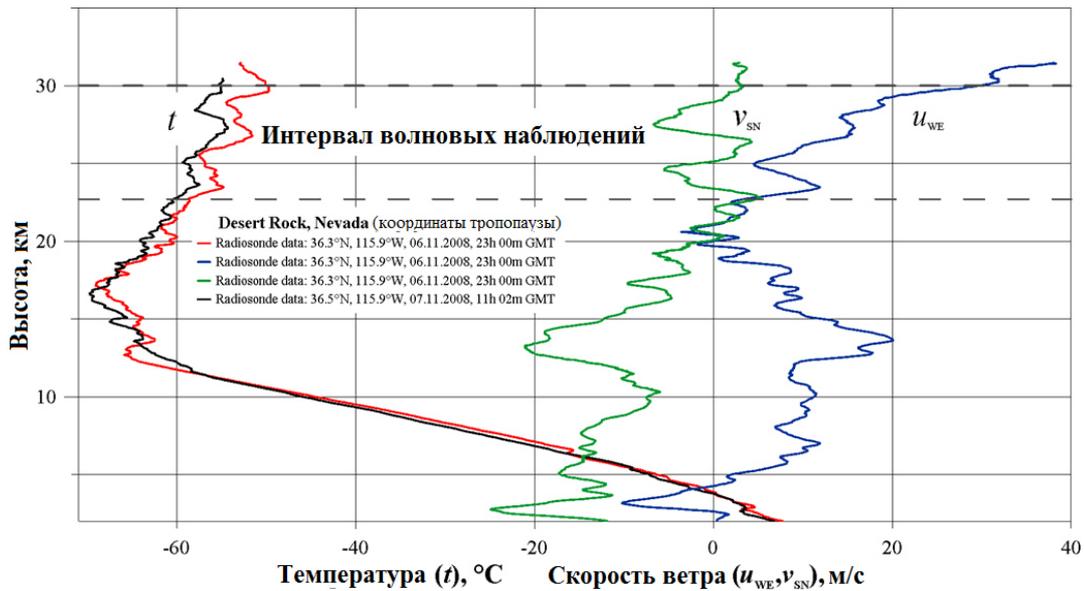


Рис. 1. Вертикальные профили температуры t , зональной u_{WE} и меридиональной v_{SN} скорости ветра, найденные из радиозондовых измерений в атмосфере Земли над пустынным районом Desert Rock, Nevada.

На рис. 3 показаны высотные профили вариаций температуры и составляющих скорости ветра, которые определялись как разность исходных и соответствующих средних профилей на рис. 2. По ним мы нашли амплитуду вариаций температуры $|T'| \approx 2.74$ К и вертикальную длину волны $\lambda_z \approx 3.4$ км возмущений скорости и температуры. Также был выбран интервал для построения годографа скорости ветра и определено значение T_b средней температуры $T_b \approx 218$ К в центре указанного интервала на высоте 26 км в атмосфере Земли.

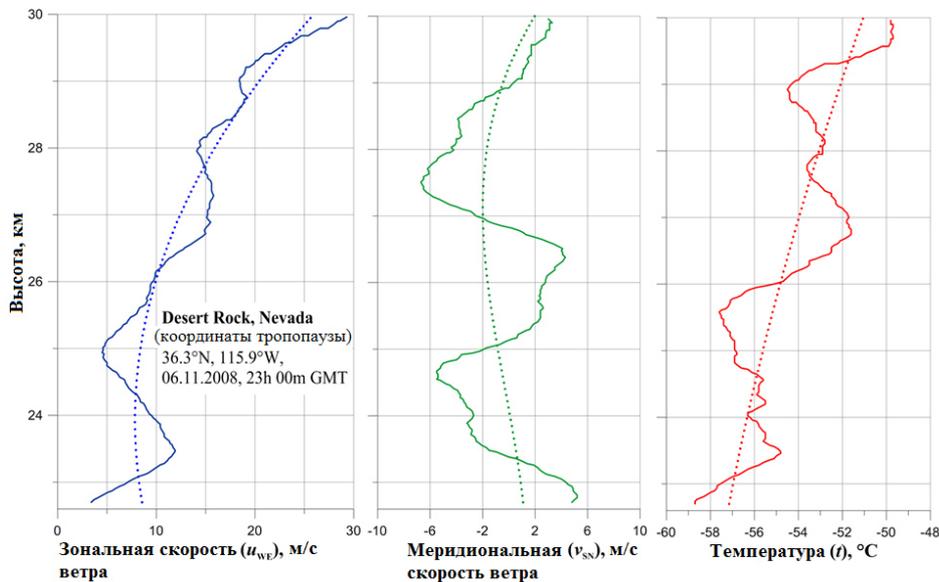


Рис. 2. Высотные профили температуры, зональной и меридиональной компонент скорости ветра, полученные из зондовых измерений 06.11.2008 года в атмосфере планеты над районом Desert Rock.

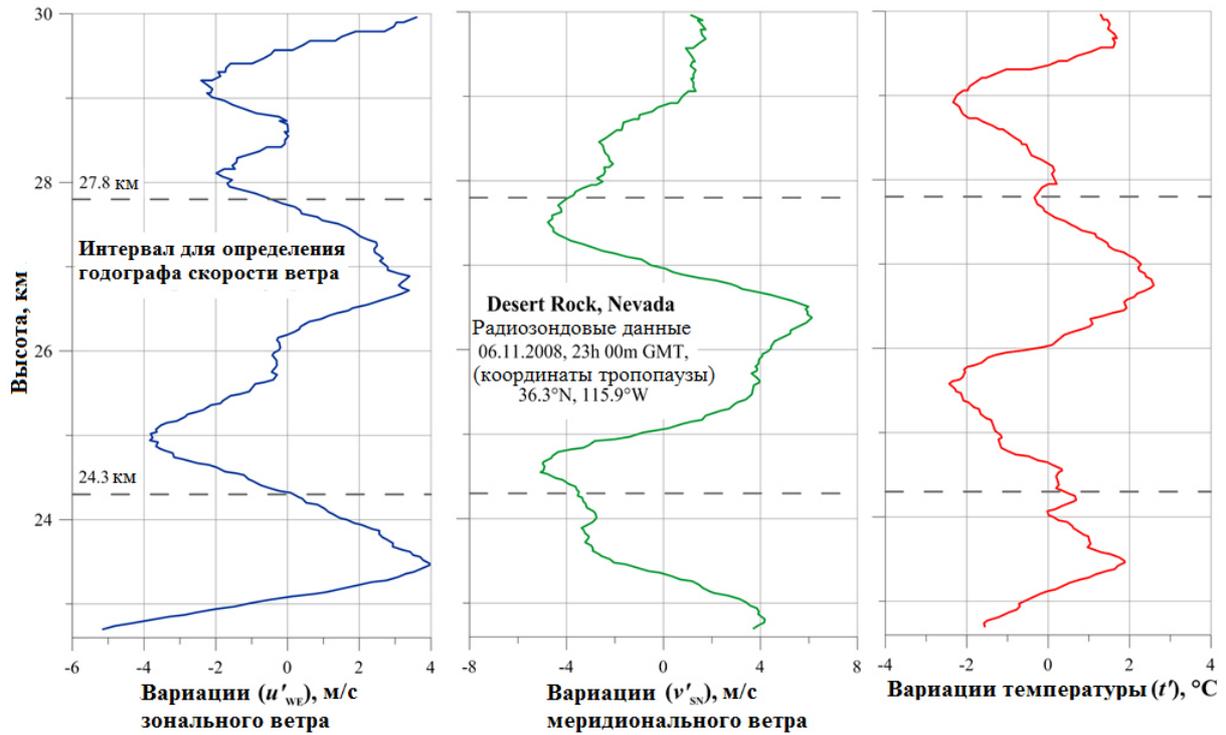


Рис. 3. Высотные профили вариаций температуры и составляющих скорости ветра, найденные из радиозондовых измерений 06.11.2008 года в атмосфере Земли над пустынным районом Desert Rock.

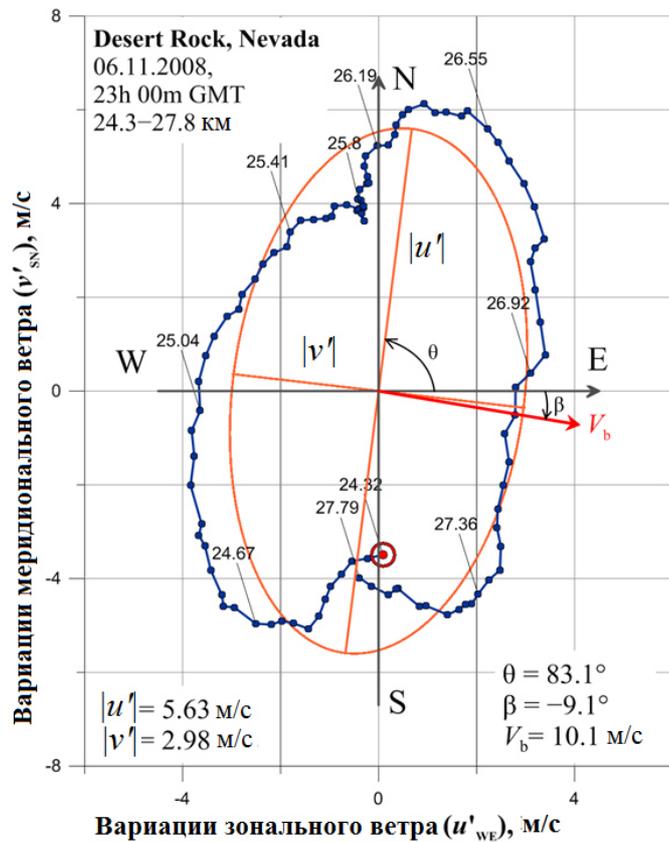


Рис. 4. Годограф вариаций скорости ветра, построенный для интервала высот 24.3–27.8 км в атмосфере планеты над районом Desert Rock.

На рис. 4 представлен годограф горизонтальных вариаций скорости ветра для интервала высот 24.3–27.8 км в атмосфере планеты. Абсцисса и ордината показывают значения зональной и меридиональной компонент соответственно. Здесь точки – экспериментальные данные, \odot – начальная точка годографа, числа вблизи точек указывают высоту в километрах. Стрелкой показано направление средней скорости ветра \mathbf{V}_b на высоте 26 км. Гладкой сплошной линией показан эллипс МНК-аппроксимации анализируемых данных, длины большой и малой полуосей которого определяют амплитуды $|u'|$ и $|v'|$ горизонтальных возмущений скорости: $|u'| \simeq 5.63$ м/с и $|v'| \simeq 2.98$ м/с. Согласно теории внутренних атмосферных волн, вращение конца вектора вариаций скорости ветра по часовой стрелке с увеличением высоты в Северном полушарии соответствует распространению фазы вниз и переносу волновой энергии вверх.

Мы вычислили значение параметра Кориолиса $f \simeq 0.86 \cdot 10^{-4}$ рад/с в пункте измерений и, используя формулу (6) работы [1], нашли отношение f/ω и собственную частоту ω : $f/\omega \simeq 0.53$ и $\omega \simeq 1.63 \cdot 10^{-4}$ рад/с (собственный период волны равен $T^{\text{in}} = 2\pi/\omega \simeq 10.7$ часа). Далее с помощью уравнения (1) работы [1] была определена величина собственной горизонтальной фазовой скорости $|c - \bar{u}| \simeq 13.9$ м/с и вычислена горизонтальная длина волны $\lambda_h = |c - \bar{u}| T^{\text{in}} \simeq 535$ км. Учитывая соотношение (3) работы [1], была найдена амплитуда вертикальных возмущений скорости ветра $|w'| \simeq 3.6 \cdot 10^{-2}$ м/с. Используя известное соотношение между собственной частотой ω и частотой волны σ в системе отсчета земного наблюдателя $\sigma = \omega + \mathbf{k}_h \mathbf{V}_b$, мы определили частоту σ . Зная направление большой оси эллипса годографа, можно найти направление горизонтального волнового вектора \mathbf{k}_h с неопределенностью 180° . Угол между векторами \mathbf{k}_h и \mathbf{V}_b (рис. 4) близок к прямому углу (92.2° или 87.8°), поэтому $\mathbf{k}_h \mathbf{V}_b \simeq 0$ и $\sigma \simeq \omega \simeq 1.63 \cdot 10^{-4}$ рад/с. Период волны в неподвижной системе отсчета $T^{\text{ob}} = 2\pi/\sigma \simeq 10.7$ часа совпадает с собственным периодом T^{in} , его значение близко к обсуждаемой ранее величине ~ 12 часов. Это подтверждает гипотезу, что наблюдаемые квазипериодические вариации (рис. 1) обусловлены ВГВ, а не полусуточным тепловым приливом.

Внутренние волны будут только тогда воздействовать на невозмущенный ветер или приводить к перемешиванию составляющих в атмосфере, когда возникает диссипация энергии ВГВ. Полагают, что динамическая и конвективная неустойчивости являются основными процессами, приводящими к диссипации энергии внутренних атмосферных волн [2–4], однако имеют место и другие механизмы (молекулярная диффузия, радиационный демпинг, нелинейные взаимодействия). Конвективная или динамическая неустойчивость приводит к обрушению ВГВ, когда ее амплитуда превышает определенный порог. С помощью выражения (7) работы [1] мы вычислили значение пороговой волновой амплитуды $a \simeq 0.92$ для сдвиговой неустойчивости, которая является определяющей для низкочастотных ВГВ с $\omega \sim f$ [2]. Из-за существования пороговых амплитуд механизмы насыщения становятся нелинейными, поэтому важно знать величины реальных волновых амплитуд в экспериментах. Используя выражения (8) работы [1], мы получили две независимые оценки волновой амплитуды $a_e \simeq 0.43$ и $a_u \simeq 0.40$, которые хорошо согласуются между собой. Последнее указывает на высокое качество анализируемых данных о температуре и скорости ветра и свидетельствует о том, что поляризационное соотношение (4) работы [1] удовлетворяется. Это является особенно важным при применении модернизированного метода годографа скорости ветра в случаях, когда собственные частоты ВГВ существенно превосходят значения

параметра Кориолиса. Из выражений (9) работы [1] нами были найдены двумя разными способами оценки степени насыщения внутренних атмосферных волн $d_e \simeq 0.47 = 47\%$ и $d_u \simeq 0.44 = 44\%$. При радиозатменном мониторинге активности ВГВ в атмосферах планет [5–8] используется предположение о насыщении волновой амплитуды. Из полученных результатов следует, что положение о насыщении ВГВ выполняется не всегда и это может приводить к систематическим погрешностям и смещению значений восстанавливаемых волновых характеристик. В таких случаях оценки собственной частоты будут систематически занижаться, а значения горизонтальной длины волны – завышаться. Проведенный анализ показывает, что усовершенствованный метод анализа годографа скорости ветра позволяет надежно идентифицировать следы ВГВ в данных радиозондовых измерений, а также определять характеристики и степень насыщения внутренних волн в атмосфере Земли без привлечения каких-либо предположений.

Работа выполнена в рамках государственного задания и частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект РФФИ № 19-02-00083 А) и Программой № 12 Президиума РАН.

Литература

1. Губенко В.Н., Кириллович И.А. Развитие методов исследования внутренних гравитационных волн в атмосфере Земли с помощью радиозондовых измерений // X Всероссийские открытые Армандовские чтения. Материалы IV Всероссийской научной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн», Муром, 23–25 июня 2020 г.
2. 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.
3. Fritts D.C., Alexander M.J. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere // *Rev. Geophys.* 2003. V. 41. No. 1. P. 1–59. doi: 10.1029/2001RG000106.
4. Губенко В.Н., Кириллович И.А. Диагностика насыщения внутренних атмосферных волн и определение их характеристик в стратосфере Земли с помощью радиозондовых измерений // *Солнечно-земная физика.* 2018 Т. 4. № 2. С. 76–85. doi: 10.12737/szf-42201807.
5. 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. D08109. doi: 10.1029/2007JD008920.
6. 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.
7. Губенко В.Н., Павельев А.Г., Салимзянов Р.Р., Андреев В.Е. Методика определения параметров внутренней гравитационной волны по измерению вертикального профиля температуры или плотности в атмосфере Земли // *Космические исследования.* 2012. Т. 50. № 1. С. 23–34.
8. Губенко В.Н., Кириллович И.А., Павельев А.Г. Характеристики внутренних волн в атмосфере Марса, полученные на основе анализа вертикальных профилей температуры миссии Mars Global Surveyor // *Космические исследования.* 2015. Т. 53. № 2. С. 141–151. doi: 10.7868/S0023420615020028.