

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВНУТРЕННИХ ВОЛН В СТРАТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ ПО ДАННЫМ АНАЛИЗА РАДИОЗОНДОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

И.А. Кириллович, В.Н. Губенко

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (Фрязинский филиал), Фрязино, Россия
sabersecretmail@gmail.com

RESTORING THE INTERNAL WAVE CHARACTERISTICS IN THE EARTH'S STRATOSPHERE, USING THE ANALYSIS OF RADIOSONDE MEASUREMENTS

I.A. Kirillovich, V.N. Gubenko

Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS (Fryazino Branch), Fryazino, Russia

Аннотация. Представлены результаты определения реальной и пороговой амплитуды, степени насыщения и других характеристик для идентифицированных внутренних гравитационных волн (ВГВ) в атмосфере Земли, полученные из анализа высокоточных радиозондовых измерений SPARC (<http://www.sparc.sunysb.edu/>) температуры и скорости горизонтального ветра. Обсуждается полезность зондовых исследований внутренних волн для валидации результатов радиозатменного мониторинга ВГВ в атмосфере планеты.

Ключевые слова: атмосфера Земли, радиозондовые измерения скорости ветра и температуры, внутренние гравитационные волны.

Abstract. The results of determination of the actual and threshold amplitudes, saturation degree and other characteristics for identified internal gravity waves (IGWs) in the Earth's atmosphere found from high-resolution radiosonde measurements SPARC (<http://www.sparc.sunysb.edu/>) of temperature and horizontal wind speed are presented. The usefulness of the presented probe observations in conjunction with radio occultation studies of IGWs and their validation is discussed.

Keywords: Earth's atmosphere, radiosonde measurements of the wind speed and temperature, internal gravity waves.

Введение

Фундаментальной задачей физики атмосферы является исследование волновых процессов, которые определяют атмосферную динамику Земли. Установлено, что внутренние гравитационные волны (ВГВ) обеспечивают эффективный перенос энергии и импульса с нижних уровней земной атмосферы на верхние. Поскольку ВГВ являются характерной особенностью стабильно стратифицированной атмосферы, то аналогичные эффекты можно ожидать и в атмосферах других планет [Gubenko et al., 2008a, 2015]. Потенциальными источниками внутренних волн в атмосфере являются тепловые контрасты вблизи поверхности, топография, сдвиговая неустойчивость ветра, конвекция и фронтальные процессы [Fritts, Alexander, 2003]. Исследования волновых вариаций температуры и скорости ветра в атмосфере Земли показали, что амплитуды возмущений возрастают с увеличением высоты, однако недостаточно быстро, чтобы соответствовать их росту из-за экспоненциального уменьшения плотности с высотой в отсутствие диссипации энергии. Теория объясняет это замедление темпа роста амплитуды следующим образом: по мере распространения волны вверх, происходит диссипация волновой энергии таким образом, что амплитуда ВГВ поддерживается на уровне порога сдвиговой неустойчивости в атмосфере (насыщение волновой амплитуды). При радиозатменном мониторинге волновой активности в атмосферах планет используется ключевое предположение о насыщении волновой амплитуды [Gubenko et al., 2008b, 2011, 2012,

2015], поэтому зондовые исследования ВГВ важны для проверки и валидации полученных результатов. Целью данной работы является идентификация волновых событий, определение характеристик и степени насыщения ВГВ по данным одновременных зондовых измерений температуры и скорости ветра в атмосфере Земли. Основные соотношения для внутренних волн и описание метода годографа скорости ветра, которые использовались нами для анализа, представлены в работах [Hines, 1988; Zink, Vincent, 2001; Губенко и др., 2014; Gubenko et al., 2008b, 2011, 2012, 2015].

Анализ экспериментальных результатов и выводы

Рассмотрим пример практического применения метода годографа к анализу одновременных зондовых измерений скорости ветра и температуры в атмосфере Земли. Указанные данные находятся в свободном доступе на сайте <http://www.sparc.sunysb.edu/>. Измерения проводились с интервалами в 6 сек, что соответствует вертикальному разрешению ~ 30 м при скорости подъема аэростата ~ 5 м/с. Точность определения температуры и скорости ветра равна ~ 0.2 К и ~ 1 м/с, соответственно.

На рис. 1 (левая панель) представлены два профиля температуры, полученные из измерений в атмосфере над районом Desert Rock, проведенных с интервалом ~ 12 ч. Высотная корреляция квазипериодических вариаций температуры для двух профилей в выделенном интервале предполагает, что эти

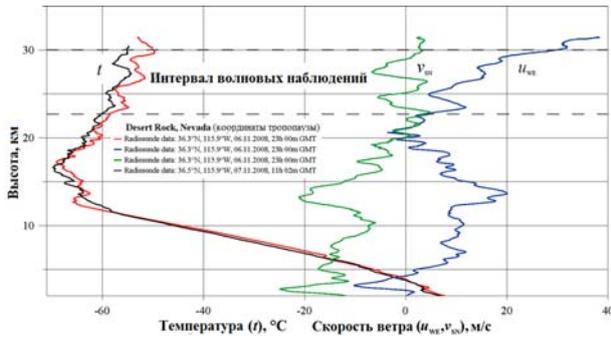


Рис. 1. Профили компонент зональной (u_{WE}) и меридиональной (v_{SN}) скорости ветра и температуры (t) в атмосфере

вариации могут быть обусловлены ВГВ или тепловым приливом с периодом около 12 ч в системе отсчета земного наблюдателя. Для проверки данного предположения мы провели совместный анализ данных о температуре и скорости ветра (средняя и правая панели рис. 1) для сеанса измерений 06.11.2008 г. Здесь, зональным принято направление с запада на восток, а меридиональным — с юга на север.

На рис. 2 показаны анализируемые профили для выделенного интервала волновых проявлений. Пунктиром представлены соответствующие средние (невозмущенные) профили, вычисленные на основе аппроксимации исходных данных полиномом 3-ей степени методом наименьших квадратов (МНК). На основе среднего профиля температуры, мы получили оценку параметра стабильности атмосферной стратификации N_b для анализируемого интервала $N_b \approx 2.18 \cdot 10^{-2}$ рад/с.

Рисунок 3 демонстрирует профили вариаций температуры и составляющих скорости, которые определялись как разность исходных и соответствующих средних профилей на рис. 2. На их основе нами были найдены амплитуда вариаций температуры $|T'| \approx 2.47$ К и вертикальная длина волны $\lambda_z \approx 3.4$ км возмущений скорости и температуры. Также был выбран интервал для построения годографа и определено значение T_b невозмущенной температуры $T_b \approx 218$ К в центре интервала на высоте 26 км.

На рис. 4 представлен годограф горизонтальных вариаций скорости ветра для интервала высот

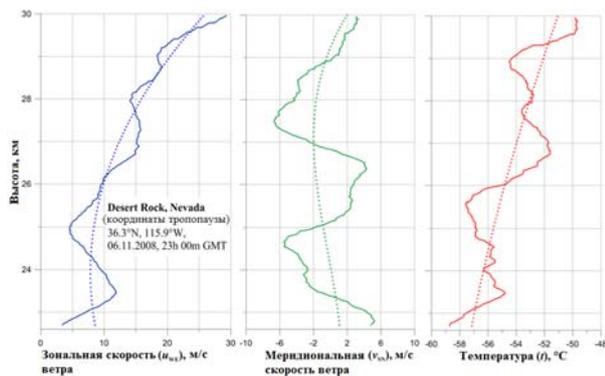


Рис. 2. Высотные профили температуры, и компонент скорости ветра для выделенного интервала (сеанс 06.11.2008)

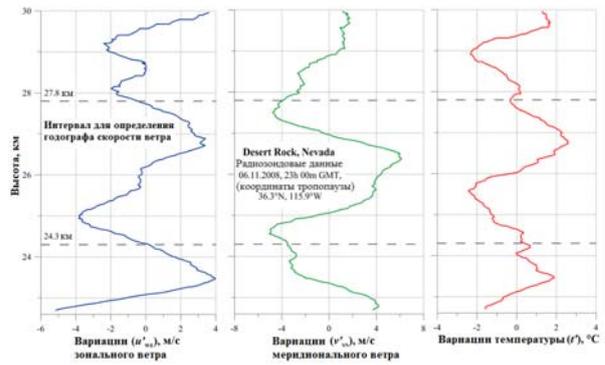


Рис. 3. Высотные профили вариаций температуры и составляющих скорости

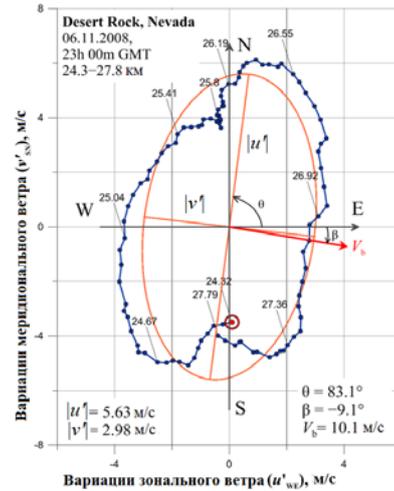


Рис. 4. Годограф вариаций скорости ветра для интервала высот 24.3–27.8 км

24.3–27.8 км. Абсцисса и ордината показывают значения зональной и меридиональной компонент, соответственно. Здесь точки — оригинальные данные, \odot — начальная точка годографа, числа вблизи точек указывают высоту в км. Стрелкой показано направление средней скорости ветра V_b на высоте 26 км. Там же представлен гладкой сплошной линией эллипс МНК-аппроксимации анализируемых данных, длины большой и малой полуосей которого определяют амплитуды $|u'|$ и $|v'|$ горизонтальных возмущений скорости: $|u'| \approx 5.63$ м/с и $|v'| \approx 2.98$ м/с. Согласно теории, вращение конца вектора вариаций скорости по часовой стрелке с увеличением высоты в Северном полушарии соответствует переносу волновой энергии вверх.

Мы вычислили значение параметра Кориолиса $f \approx 0.86 \cdot 10^{-4}$ рад/с в пункте наблюдений и нашли отношение f/ω и собственную частоту ω : $f/\omega \approx 0.53$ и $\omega \approx 1.63 \cdot 10^{-4}$ рад/с (собственный период волны равен $T^{in} = 2\pi/\omega \approx 10.7$ ч). Далее была определена величина собственной горизонтальной фазовой скорости $|c - \bar{u}| \approx 13.9$ м/с и вычислена горизонтальная длина волны $\lambda_h = |c - \bar{u}| \cdot T^{in} \approx 535$ км. Также была найдена амплитуда вертикальных возмущений скорости ветра $|w'| \approx 3.6 \cdot 10^{-2}$ м/с. Используя соотношение связи между собственной частотой ω и частотой

той волны σ в системе отсчета земного наблюдателя $\sigma = \omega + \mathbf{k}_h \cdot \mathbf{V}_b$, было определено значение σ . Известно, что направление большой оси эллипса годографа указывает направление вектора \mathbf{k}_h с неопределенностью 180° . Как видно из рис. 4, угол между векторами \mathbf{k}_h и \mathbf{V}_b близок к прямому углу (92.2° или 87.8°), поэтому $\mathbf{k}_h \cdot \mathbf{V}_b \simeq 0$ и $\sigma \simeq \omega \simeq 1.63 \cdot 10^{-4}$ рад/с. Период волны в неподвижной системе отсчета $T^{ob} = 2\pi/\sigma \simeq 10.7$ ч совпадает с собственным периодом T^{in} и его значение близко к величине ~ 12 ч. Это свидетельствует о том, что наблюдаемые квазипериодические вариации температуры и скорости ветра обусловлены ВГВ, а не тепловым приливом.

Проведенный анализ показывает, что метод годографа скорости ветра позволяет идентифицировать следы ВГВ в данных радиозондовых измерений, определять характеристики и степень насыщения внутренних волн в атмосфере Земли. Работа выполнена при частичной поддержке Программы 1.7 Президиума РАН.

Список литературы

Губенко В.Н., Кириллович И.А., Павельев А.Г. Дистанционные радиозатменные исследования внутренних волн в атмосфере Земли и их валидация по данным прямых зондовых измерений // Труды XXIV Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн» (РРВ-24). Иркутск. 2014. Т. 3., С. 137–142.

Губенко В.Н., Кириллович И.А., Павельев А.Г., Андреев В.Е. Обнаружение насыщенных внутренних гравитационных волн и реконструкция их характеристик в атмосфере Марса // Изв. вузов. Физика. 2016. Т. 59, № 12/2. С. 46–49.

Fritts D.C., Alexander M.J. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere // *Rev. Geophys.* 2003. V. 41, N 1. P. 1003. DOI: 10.1029/2001RG000106.

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.* 2008a. V. 113, N E03001. DOI: 10.1029/2007JE002940.

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.* 2008b. V. 113, N D08109. DOI: 10.1029/2007JD008920.

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, N 10. P. 2153–2162. DOI: 10.5194/amt-4-2153-2011.

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, N 1. P. 21–31. DOI: 10.1134/S0010952512010029.

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, N 2. P. 133–142. DOI: 10.1134/S0010952515020021.

Hines C.O. Tropopausal mountain waves over Arecibo: A case study // *J. Atmos. Sci.* 1988. V. 46, N 4. P. 476–488.

Zink F., Vincent R.A. Wavelet analysis of stratospheric gravity wave packets over Macquarie Island, 1. Wave parameters // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106, N D10. P. 10275–10288.