Диагностика степени насыщения внутренних атмосферных волн по данным радиозондовых измерений в атмосфере Земли

Губенко В.Н., Кириллович И.А. Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН; Московская обл., 141190 Фрязино, пл. акад. Б.А. Введенского д. 1, Тел. +7 496 565 25 55, E-mail: vngubenko@gmail.com

Ключевые слова: атмосфера Земли, внутренние гравитационные волны, насыщение, радиозондовые измерения, скорость ветра, температура.

Важная роль внутренних гравитационных волн (ВГВ) связана с тем, что они обеспечивают эффективный механизм переноса энергии и импульса из нижних слоев атмосферы в верхние. Большой интерес к ВГВ со стороны специалистов по ионосфере связан с тем, что многие ионосферные процессы и процессы распространения радиоволн хорошо объясняются путем привлечения понятий атмосферных волн. Согласно интерпретации, принятой в настоящее время, перемещающиеся ионосферные возмущения и спорадические Е-слои представляют собой ионосферное проявление волн в преимущественно нейтральной атмосфере Земли (Gubenko et al., 2018). Поскольку ВГВ являются характерной особенностью устойчиво стратифицированной атмосферы, то аналогичные эффекты можно ожидать в атмосферах Марса и Венеры (Gubenko et al., 2008a; Губенко и др., 2015, 2016a; Yakovlev et al., 1991). Наблюдения флуктуаций температуры и скорости ветра обусловленных внутренними волнами в атмосфере Земли показали, что волновые амплитуды возрастают с увеличением высоты, однако недостаточно быстро, чтобы соответствовать их росту из-за экспоненциального уменьшения плотности в отсутствие диссипации энергии. Линейная теория ВГВ объясняет такое замедление темпа роста амплитуды следующим образом: если волновая амплитуда превышает пороговую величину, это приводит к неустойчивости и возникновению турбулентности, которая препятствует дальнейшему увеличению амплитуды (насыщение внутренних волн). Полагают, что динамическая (сдвиговая) и конвективная неустойчивости являются теми механизмами, которые вносят наибольший вклад в диссипацию энергии и насыщение внутренних волн в атмосфере.

Спутниковые наблюдения в атмосфере радиозатменным методом являются мощным средством радиофизических исследований активности ВГВ по всей планете с почти однородным и высоким качеством экспериментальных данных. Однако, радиозатменные исследования внутренних волн в средней атмосфере Земли (Gubenko et al. 2008b, 2011; Губенко и др., 2012, 2016b) используют данные одной системы наблюдения. Обычно это обеспечивает информацию только об одной независимой переменной (температуре или плотности) и обусловливает некоторую неоднозначность описания волнового поля. Когда две инструментальные системы измерений используются вместе, можно добиться значительно более полного определения характеристик волнового поля и атмосферных эффектов ВГВ. Изучение одновременных данных о скорости ветра и температуре, полученных при проведении радиозондовых измерений, позволяет больше внимания уделить роли, которую играют внутренние волны в атмосферной динамике. Зондовые измерения обеспечивают проверку радиозатменных волновых исследований, которые используют анализ обусловленных внутренними волнами вариаций температуры или плотности в предположении насыщения амплитуды волнового поля (разработанный нами SWA-метод (saturated wave assumption)). Изучение одновременных возмущений температуры и скорости ветра дает возможность оценить степень насыщения ВГВ без каких-либо предположений, проверить обоснованность и корректность предположения о насыщении внутренних волн и, следовательно, определить эффективность разработанного SWA-метода (Губенко, Кириллович, 2018). Знание реальных и пороговых волновых амплитуд необходимо при оценке воздействия внутренних волн на невозмущенную атмосферу. Поскольку предположение о насыщении амплитуды внутренних волн играет ключевую роль при радиофизическом мониторинге ВГВ в атмосферах планет (Gubenko et al., 2008b, 2011; Губенко и др., 2012, 2015, 2016a, b), радиозондовые исследования процессов насыщения в атмосфере Земли являются актуальными и важными. Предлагаемый в этой работе усовершенствованный метод годографа основан на комбинированном анализе одновременных измерений скорости ветра и температуры, в котором используется поляризационное соотношение между волновыми вариациями скорости и температуры с целью достижения минимальных погрешностей в результатах реконструкции характеристик внутренних атмосферных волн. В докладе представлены результаты определения реальных и пороговых амплитуд, степени насыщения и других характеристик для идентифицированных ВГВ, полученные из анализа радиозондовых измерений скорости ветра и температуры SPARC (Stratospheric Processes And their Role in Climate) в атмосфере Земли.

Работа выполнена при частичной поддержке Программы 28 Президиума Российской академии наук.

Литература

1. *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.

2. *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.
3. *Губенко В.Н., Кириллович И.А., Павельев А.Г., Андреев В.Е.* Обнаружение насыщенных внутренних гравитационных волн и реконструкция их характеристик в атмосфере Марса // Известия ВУЗов. Физика. 2016a. Т. 59. № 12-2. С. 45–48.
4. *Губенко В.Н., Кириллович И.А., Лиу Й.-А., Павельев А.Г.* Мониторинг активности внутренних гравитационных волн в атмосфере Арктики и Антарктики // Известия ВУЗов. Физика. 2016b. Т. 59. № 12-3. С. 79–83.
5. *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.
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 // Journal of Geophysical Research. 2008a. Vol. 113. No. E03001, doi: 10.1029/2007JE002940,
7. *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. 2008b. Vol. 113. No. D08109, doi:10.1029/2007JD008920
8. *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 // Atmospheric Measurement Techniques. 2011. Vol. 4. No. 10. P. 2153–2162, doi: 10.5194/amt-4-2153–2011,
9. *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 // Advances in Space Research. 2018. Vol. 61. No. 7. P. 1702–1716, doi: 10.1016/j.asr.2017.10.001.
10. *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. Vol. 94. No. 2. P. 493–510, doi: 10.1016/0019-1035(91)90243-M.