

# Радиозатменный спутниковый мониторинг активности внутренних волн в атмосферах планет

Кириллович И.А., Губенко В.Н. 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](mailto:vngubenko@gmail.com)

Ключевые слова: атмосфера, Земля, Венера, Марс, внутренние гравитационные волны, насыщение волновой амплитуды, радиозатменный мониторинг, вертикальные профили температуры и плотности

Спутниковые наблюдения в атмосфере радиозатменным методом являются мощным средством радиофизических исследований активности внутренних гравитационных волн (ВГВ) по всей планете с почти однородным и высоким качеством экспериментальных данных. Преимуществом радиозатменных измерений с целью изучения внутренних атмосферных волн является широкий географический и временной охват исследуемых районов, позволяющий проводить глобальный мониторинг волновой активности в атмосфере планеты. Этот метод дает возможность получать в глобальном масштабе вертикальные профили атмосферных параметров (давления, плотности и температуры) с высоким вертикальным разрешением при любых погодных условиях (Pavelyev et al., 2009, 2012, 2015). Анализ вертикальных профилей вариаций температуры, определяемых из радиозатменных экспериментов, ранее дал возможность найти некоторые статистические характеристики (потенциальную энергию ВГВ на единицу массы) внутренних волн в атмосфере Земли. Однако до недавнего времени исследователи полагали, что восстанавливаемых вертикальных профилей температуры и плотности в радиозатменных экспериментах недостаточно для количественного описания волновых эффектов в атмосфере планеты (Губенко и др., 2012, 2015).

В этой связи был разработан метод идентификации дискретных волновых событий и реконструкции параметров ВГВ по результатам анализа индивидуальных вертикальных профилей температуры, плотности или квадрата частоты Брента—Вяйсяля в атмосфере планеты (Gubenko et al., 2008, 2011; Губенко и др., 2012, 2015). Метод не требует какой-либо дополнительной информации, не содержащейся в профиле, и может быть использован для анализа вертикальных профилей, полученных любыми способами. Сформулирован и обоснован дискриминационный критерий идентификации волновых событий, при выполнении которого анализируемые вариации могут рассматриваться как волновые проявления (Gubenko et al., 2008, 2011; Губенко и др., 2012, 2015). Метод базируется на анализе относительной волновой амплитуды, а также на положении линейной теории ВГВ, согласно которому волновая амплитуда ограничена пороговой величиной динамической (сдвиговой) неустойчивости в атмосфере. Предполагается, что, когда амплитуда внутренней волны достигает порога сдвиговой неустойчивости по мере распространения волны вверх, диссипация волновой энергии происходит таким образом, что амплитуда ВГВ поддерживается на уровне указанного порога (насыщение волновой амплитуды). Применение метода к анализу радиозатменных данных о температуре позволило нам впервые идентифицировать волновые события в атмосферах Земли и Марса, определить ключевые характеристики обнаруженных волн, включая собственную частоту ВГВ, вертикальные потоки волновой энергии и импульса (Gubenko et al., 2008, 2011; Губенко и др., 2015, 2016a, b). Результаты мониторинга волновой активности могут быть полезными при построении численных моделей циркуляции атмосферы, включающих параметризацию волновых эффектов. Разработанный метод идентификации волновых событий и реконструкции характеристик ВГВ (Gubenko et al., 2008, 2011, 2018; Губенко и др., 2012, 2015, 2016a, b; Губенко, Кириллович, 2018) получил широкое признание, как в России, так и за рубежом и сейчас успешно применяется при исследовании волновых процессов в атмосферах планет. В частности, исследователи из Франции и Швеции в работе (Rechou et al., 2014) убедительно продемонстрировали, что данные численного моделирования и анализ независимых радарных и зондовых измерений в атмосфере Земли показывают высокую эффективность метода и хорошую надежность получаемых на его основе научных результатов. Приведены и обсуждаются результаты волнового анализа радиозатменных данных о температуре спутниковых миссий в атмосферах планет.

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. 2016а. 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. 2016б. 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., 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. 2008. Vol. 113. No. D08109, doi:10.1029/2007JD008920
7. 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,
8. 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.
9. Pavelyev A.G., Liou Y.A., Wickert J., Gubenko V.N., Pavelyev A.A., Matyugov S.S. New Applications and Advances of the GPS Radio Occultation Technology as Recovered by Analysis of the FORMOSAT-3/COSMIC and CHAMP Data-Base // New Horizons in Occultation Research: Studies in Atmosphere and Climate. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. 2009. P. 165–178, doi: 10.1007/978-3-642-00321\_9.
10. Pavelyev A.G., Liou Y.A., Zhang K., Wang C.S., Wickert J., Schmidt T., Gubenko V.N., Pavelyev A.A., Kuleshov Y. Identification and localization of layers in the ionosphere using the eikonal and amplitude of radio occultation signals // Atmospheric Measurement Techniques. 2012. Vol. 5. No. 1. P. 1–16, doi: 10.5194/amt-5-1-2012.
11. Pavelyev A.G., Liou Y.A., Matyugov S.S., Pavelyev A.A., Gubenko V.N., Zhang K., Kuleshov Y. Application of the locality principle to radio occultation studies of the Earth's atmosphere and ionosphere // Atmospheric Measurement Techniques. 2015. Vol. 8. No. 7. P. 2885–2899, doi: 10.5194/amt-8-2885-2015.
12. 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 // Atmospheric Chemistry and Physics. 2014. Vol. 14. P. 6785–6799, doi: 10.5194/acp-14-6785-2014.