

Всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» - «Муром 2021»

## **Изучение сезонных распределений потенциальной энергии ВГВ в атмосфере высоких широт Земли по радиозатменным данным**

В.Н. Губенко<sup>1</sup>, И.А. Кириллович<sup>1</sup>, Д.В. Губенко<sup>1</sup>, В.Е. Андреев<sup>1</sup>, Т.В. Губенко<sup>1</sup>, А.А. Павельев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Московская область, 141190 Фрязино, пл. Введенского, дом 1, E-mail: [gubenko@fireras.su](mailto:gubenko@fireras.su), [vnngubenko@gmail.com](mailto:vnngubenko@gmail.com).

*Проведен анализ активности внутренних гравитационных волн (ВГВ) в полярных районах атмосферы Земли, расположенных на широтах более 60°. Для этого мы использовали радиозатменные данные о температуре миссии FORMOSAT-3/COSMIC, собранные за период измерений с июля 2006 по март 2009 года. Были определены и проанализированы географические и сезонные распределения плотности потенциальной энергии ВГВ (индикатор волновой активности) в интервале высот от 15 до 35 км. Ключевые слова: Земля, Арктика, Антарктика, атмосфера, вертикальные профили температуры, внутренние гравитационные волны.*

### **Study of seasonal distributions of the IGW potential energy in the Earth's high-latitude atmosphere using radio occultation data**

V.N. Gubenko<sup>1</sup>, I.A. Kirillovich<sup>1</sup>, D.V. Gubenko<sup>1</sup>, V.E. Andreev<sup>1</sup>, T.V. Gubenko<sup>1</sup>, A.A. Pavelyev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS (Fryazino branch)

*An analysis of internal gravity wave (IGW) activity in the polar atmospheric regions of the Earth (at latitudes more than 60°) using radio occultation temperature data of the FORMOSAT-3/COSMIC mission collected from July 2006 to March 2009 has been performed. Geographic and seasonal distributions of the IGW potential energy density (wave activity indicator) in the altitude interval from 15 to 35 km have been determined and analyzed. Keywords: Earth, Arctic, Antarctic, atmosphere, vertical profiles of temperature, internal gravity waves.*

### **Введение**

Внутренние гравитационные волны модулируют структуру и циркуляцию атмосферы Земли, производя квазипериодические вариации скорости ветра, температуры и плотности. Поскольку ВГВ является характерной особенностью стабильно стратифицированной атмосферы, то аналогичные эффекты можно ожидать и в атмосферах других планет. В этом контексте нами разработан оригинальный метод для идентификации внутренних волн и определения их характеристик из измерений вертикального профиля температуры или плотности в атмосфере планеты [1–4]. Данный метод не требует какой-либо дополнительной информации, не содержащейся в профиле, и может быть использован для анализа профилей, полученных разными способами. Сформулирован и обоснован пороговый критерий идентификации ВГВ. В случае, когда этот критерий удовлетворяется, анализируемые флуктуации температуры или плотности идентифицируются как волновые проявления. Метод основан на анализе относительных амплитуд волнового поля и на положении линейной теории ВГВ, согласно которому эти амплитуды ограничиваются процессами динамической (сдвиговой) неустойчивости в атмосфере. Предполагается, что когда волновая амплитуда достигает порога сдвиговой неустойчивости, то диссипация энергии в атмосфере происходит таким образом, что амплитуда ВГВ поддерживается на уровне этого порога по мере распространения волны вверх. Предложенный в работе [1] метод мы расширили с целью реконструкции полного набора характеристик ВГВ [2], включая такие важные параметры, как плотность кинетической и потенциальной энергии волн, а также потоки полной энергии и горизонтального импульса ВГВ. Нами также разработан альтернативный метод оценки

относительных волновых амплитуд и определения параметров ВГВ из анализа возмущений квадрата частоты Брента-Вяйсяля [2,4]. Применение метода к радиозатменным данным о температуре дало возможность идентифицировать ВГВ в атмосферах Земли, Марса и Венеры и определить величины ключевых волновых характеристик, таких как собственная частота, амплитуда вертикальных и горизонтальных возмущений скорости ветра, вертикальная и горизонтальная длина волны, собственная вертикальная и горизонтальная фазовая (и групповая) скорость, кинетическая и потенциальная энергия на единицу массы, вертикальные потоки полной энергии и горизонтального импульса волн.

Внутренние волны играют большую роль в формировании динамики, теплового режима и климата атмосферы Земли. Эта роль проявляется в глобальном перераспределении энергии и импульса, которая осуществляется атмосферными волнами в процессе их генерации, распространения и обрушения. В полярной атмосфере ВГВ оказывают влияние на формирование полярных стратосферных облаков, которые являются важной составляющей процесса истощения озона в атмосфере Арктики и Антарктики. При исследовании волновых процессов в нижней и средней атмосфере Земли используются различные способы зондирования с помощью радаров, лидаров, ракет, радиозондов и др. Однако только спутниковые наблюдения могут обеспечить глобальный географический и временной охват зондируемых районов и радиозатменный мониторинг атмосферы является одним из эффективных способов таких наблюдений.

Совместная американо-тайваньская спутниковая миссия FORMOSAT-3/COSMIC состоит из группировки шести малых спутников, каждый из которых имеет четыре GPS-антенны и вращается вокруг Земли по низкой орбите с высотой ~800 км. Главной научной целью миссии, стартовавшей в апреле 2006 года, является демонстрация важности радиозатменных измерений при решении задачи улучшения оперативного численного прогноза погоды (NWP). Улучшение прогноза погоды может быть достигнуто путем усвоения в имеющихся NWP-моделях данных об атмосферных характеристиках, полученных в режиме практически реального времени. Указанные данные включают поля плотности, температуры, давления и относительной влажности в атмосфере. Анализ географических и сезонных распределений атмосферных параметров необходим для понимания процессов переноса энергии и импульса, а также для выяснения реакции полярной атмосферы в ответ на глобальное потепление. Последняя задача представляется особенно важной, поскольку полярные регионы очень чувствительны к изменениям глобальной температуры и это может быть главной причиной поднятия уровня Мирового океана.

Целью этой работы является анализ активности ВГВ в полярных районах атмосферы Земли, расположенных на широтах более 60°. Для этого были использованы радиозатменные данные о температуре миссии FORMOSAT-3/COSMIC, собранные за период с июля 2006 по март 2009 года (сайт <http://tacc.cwb.gov.tw>). Ежедневное проведение около 2000 радиозатменных экспериментов, что на порядок больше их числа для предыдущих миссий, обеспечило такую плотность данных, которая дает возможность исследовать с высоким пространственным разрешением морфологию активности ВГВ в полярной стратосфере Земли.

### **Метод определения плотности потенциальной энергии волн $E_p$ и экспериментальные результаты анализа активности ВГВ по радиозатменным данным**

Потенциальная энергия ВГВ на единицу массы  $E_p$ , выбранная нами в качестве индикатора волновой активности, определяется следующим образом [2]:

$$E_p = \frac{1}{2} \frac{g^2}{N_b^2} \overline{\left(\frac{T'}{T_b}\right)^2} = \frac{1}{4} \frac{g^2}{N_b^2} \left| \frac{T'}{T_b} \right|^2, \quad (1)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $T_b$  – невозмущенная (средняя) температура,  $T'$  – возмущение температуры,  $|T'|/T_b$  – амплитуда нормированных возмущений температуры,  $N_b$  – средняя величина частоты Брента-Вяйсяля. Черта сверху в выражении (1) обозначает усреднение соответствующей величины по анализируемому интервалу высот. В данном исследовании мы используем радиозатменные результаты миссии FORMOSAT-3/COSMIC о температуре (Level 2), приведенные на сайте (<http://tacc.cwb.gov.tw>). Эти данные, имеющие хорошее разрешение по высоте, обеспечивают уникальную возможность изучения глобальной морфологии ВГВ в полярной стратосфере Земли. Точность восстановления показателя преломления составляет  $< 0.2\%$  в интервале от 10 до 20 км и понижается до значения  $0.7\%$  на высоте 30 км, а погрешность определения температуры лучше  $0.5$  К [5]. В полярных регионах Земли мы анализируем атмосферу в интервале высот от 15 до 35 км. На этих высотах влияние ионосферных шумов пренебрежимо мало и, можно ожидать, что флуктуации температуры, определяемые из радиозатменных профилей выше уровня тропопаузы ( $\sim 10$  км), дают надежную информацию об активности ВГВ в полярной атмосфере [2].

На первом этапе для каждого оригинального профиля температуры проводилась высотная интерполяция данных через  $0.2$  км, а затем определялся средний профиль температуры путем аппроксимации полиномом 3-ей степени исходного профиля внутри анализируемого интервала волновых наблюдений. Вычитая значения температуры среднего профиля из соответствующих значений оригинального профиля, мы получали профиль флуктуаций температуры. Мы полагали, что флуктуации с вертикальными длинами волн от 2 до 10 км обусловлены ВГВ. Поэтому, для выделения индуцированных внутренними волнами флуктуаций температуры, к вертикальным профилям применялась полосовая фильтрация с отсечкой на 2 и 10 км.

Для идентификации ВГВ в анализируемом профиле флуктуаций температуры мы вычисляли относительную волновую амплитуду  $a_e$ , которая определяется следующим образом [1–4]:

$$a_e = \frac{g|m|}{N_b^2} \cdot \frac{|T'|}{T_b} = \frac{2\pi \cdot g}{\lambda_z N_b^2} \cdot \frac{|T'|}{T_b}, \quad (2)$$

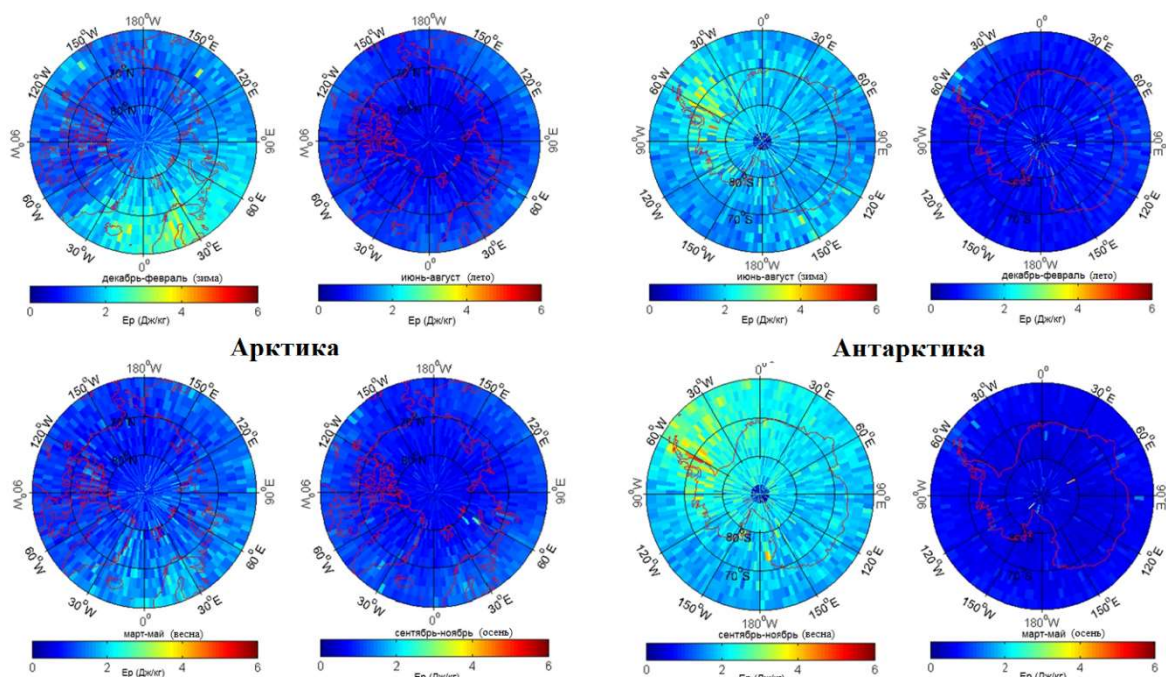
где  $\lambda_z = 2\pi/|m|$  – вертикальная длина волны,  $m$  – вертикальное волновое число. Флуктуации температуры могут рассматриваться как проявления ВГВ в том случае, если для параметра  $a_e$  выполняется неравенство:

$$0 < a_e < 1. \quad (3)$$

Пороговое ограничение для плотности потенциальной энергии внутренних волн  $E_p$ , которое следует из соотношений (1) и (2) и неравенства (3), имеет вид:

$$E_p < \frac{N_b^2}{4m^2} = \frac{N_b^2 \lambda_z^2}{16\pi^2}. \quad (4)$$

Если анализируемые флуктуации температуры идентифицировались как волновые проявления, то плотность потенциальной энергии  $E_p$  вычислялась из соотношения (1). Исследуемый диапазон высот 15 – 35 км в полярной атмосфере Земли был разделен нами на 4 одинаковых интервала, протяженностью 5 км каждый. Усредненная по интервалу в 5 км величина  $E_p$  бралась в качестве характеристики  $E_p$  этого интервала для места зондирования и времени проведения измерений. Для каждого месяца измерений, определяемые таким образом величины  $E_p$  распределялись по горизонтальным ячейкам с размерами  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  по широте и по долготе. Усреднение данных, накопившихся в ячейке за конкретный месяц или сезон, давало нам возможность получить средние месячные и сезонные оценки  $E_p$  для выбранной ячейки, соответственно.

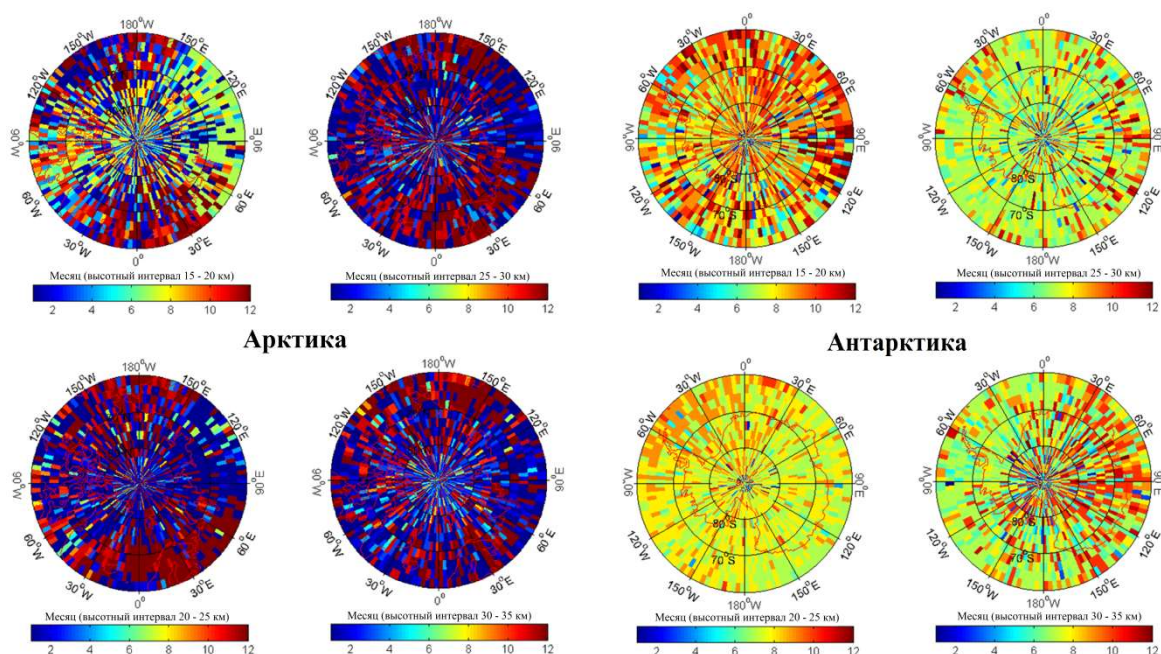


**Рис. 1. Географические распределения месячных средних значений  $E_p$  для различных сезонов в 2006–2009 году, усредненных по интервалу 20–25 км в атмосфере Арктики (слева) и Антарктики (справа).**

Для определения глобальной морфологии плотности потенциальной энергии внутренних волн  $E_p$  в атмосфере Арктики и Антарктики нами была использована большая база данных, охватывающая радиозатменные измерения за почти трехлетний период, которые с хорошей плотностью распределены по широте и по долготе. Поэтому месячные и сезонные средние характеристики имеют высокую статистическую значимость. Географические распределения усредненной по интервалу 20–25 км плотности потенциальной энергии ВГВ в атмосфере Арктики и Антарктики для различных сезонов представлены на рис.1. Видно, что активность ВГВ является сильной в зимний и весенний периоды и слабой летом и осенью. Однако, максимальные значения плотности потенциальной энергии внутренних волн в атмосфере Арктики достигаются в зимний период. Кластер значительной волновой активности охватывает атмосферу, расположенную на широтах  $60^\circ\text{--}70^\circ\text{N}$  и долготах  $30^\circ\text{W--}90^\circ\text{E}$ . В Арктическом регионе, повышенная волновая активность наблюдается, главным образом, над северной Атлантикой (Исландия) и над Скандинавией.

Полученные результаты демонстрируют высокую волновую активность в Антарктический зимний и весенний периоды и слабую активность ВГВ летом и осенью. Потенциальная энергия внутренних волн достигает своего максимума весной и опускается до минимальных значений в осенний период. Волны с большой потенциальной энергией обнаруживаются зимой в атмосферных районах с долготой  $30^\circ\text{--}90^\circ\text{W}$ , окружающих Антарктический полуостров. Часть указанных районов атмосферы ( $30^\circ\text{--}60^\circ\text{W}$ ) расположена над морем, а другая часть атмосферного кластера высокой активности ВГВ ( $60^\circ\text{--}90^\circ\text{W}$ ) находится над сушей. Расположение кластера высокой волновой активности в весенний период практически такое же, что и зимой, однако его размеры становятся больше.





**Рис. 2. Географические распределения месяцев наибольшей активности ВГВ для различных высотных интервалов в 2006–2009 году в атмосфере над Арктикой (слева) и Антарктикой (справа).**

На рис. 2 показаны географические распределения месяцев наибольшей активности ВГВ для различных высотных интервалов в 2006–2009 году в атмосфере над Арктикой и Антарктикой. В Арктике на высотах от 15 до 35 км в атмосфере максимальная активность ВГВ наблюдается в период с ноября по февраль. В Антарктике для интервала 15–20 км трудно выделить какой-либо месяц повышенной волновой активности. Здесь на высотах от 20 до 25 км наибольшая активность ВГВ имеет место в июле, августе и сентябре, но август охватывает, пожалуй, большую часть территории Антарктики. Доминирующими месяцами в интервале высот 25–30 км являются июль и август, однако июль – преобладающий месяц активности ВГВ.

### Заключение

Мы исследовали активность атмосферных ВГВ на высотах 15–35 км, как в Арктическом, так и Антарктическом регионах на широтах больше 60°, используя базу радиозатменных данных FORMOSAT-3/COSMIC с июля 2006 по март 2009 года. На основе анализа температурных профилей радиозатменной миссии COSMIC мы вычисляли вертикальные профили средней температуры, квадрата частоты Брента-Вяйсяля и флуктуаций температуры с длиной волны от 2 до 10 км. Затем мы определили плотность потенциальной энергии волн  $E_p$  в интервалах высот 15–20 км, 20–25 км, 25–30 км и 30–35 км. Величины  $E_p$  усреднялись для каждого месяца и каждого сезона в горизонтальных ячейках с размерами 2.5°x 2.5° по широте и долготе. Плотность потенциальной энергии ВГВ увеличивается с высотой вплоть до уровня 35 км, как в Северном, так и Южном полушариях Земли. Было найдено, что существенное увеличение потенциальной энергии  $E_p$  зимой и весной обнаруживается над некоторыми горными массивами, такими как Скандинавия, Исландия, Гренландия, Антарктический полуостров и Трансантарктические горы (рис. 1). Поэтому орографические эффекты являются, по-видимому, одним из основных механизмов генерации ВГВ в полярных регионах. Однако линия визирования радиозатменных наблюдений FORMOSAT-3/COSMIC во всех районах была ориентирована преимущественно вдоль оси Север-Юг, что дает орографическим волнам преимущество при их регистрации [5].

Это обстоятельство предполагает завышенную оценку активности орографических волн в данном случае по сравнению со случаем изотропного источника внутренних волн.

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

### **Литература**

1. 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.
2. Gubenko V.N., Pavelyev A.G., Salimzyanov R.R., and 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.
3. 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. No. 1. P. 21–31, doi: 10.1134/S0010952512010029.
4. 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. No. 2. P. 133–142, doi: 10.1134/S0010952515020021.
5. Alexander S. P., Klekociuk A. R., Tsuda T. Gravity wave and orographic wave activity observed around the Antarctic and Arctic stratospheric vortices by the COSMIC GPS-RO satellite constellation // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. D17103, doi: 10.1029/2009JD011851.