

Восстановление характеристик внутренних гравитационных волн по результатам обработки и анализа радиозатменных измерений спутниковых миссий CHAMP, GRACE и COSMIC-1 в нижней стратосфере Земли

В.Н. Губенко¹, В.Е. Андреев¹, И.А. Кириллович¹

¹Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН 141190, г. Фрязино, Московская область, пл. Введенского, 1
E-mail: gubenko@firer.ru, vnngubenko@gmail.com

Разработан метод реконструкции характеристик внутренних гравитационных волн (ВГВ) по данным анализа возмущений вертикального профиля температуры, плотности или частоты плавучести (Брента-Вайселя) в атмосфере планеты. Сформулирован пороговый критерий идентификации ВГВ, в случае выполнения которого анализируемые флуктуации могут рассматриваться как волновые проявления. Применение метода к анализу радиозатменных данных спутниковых миссий CHAMP, GRACE и COSMIC-1 позволило идентифицировать волновые события в атмосфере Земли и реконструировать ключевые характеристики для обнаруженных волн. Проведен анализ активности ВГВ в нижней стратосфере районов Арктики и Антарктики. Для этого были использованы радиозатменные данные о температуре (Level 2) миссии COSMIC-1, собранные за период измерений с июля 2006 по март 2009 года. Определены и проанализированы сезонные распределения плотности потенциальной энергии ВГВ (индикатор волновой активности) в интервале высот от 15 до 35 км. Ключевые слова: радиозатменные спутниковые измерения, нижняя стратосфера Земли, внутренние гравитационные волны

Reconstruction of the internal gravity wave characteristics based on the results of processing and analysis of radio occultation measurements from the CHAMP, GRACE and COSMIC-1 satellite missions in the Earth's lower stratosphere

V.N. Gubenko¹, V.E. Andreev¹, I.A. Kirillovich¹

¹ Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of Russian Academy of Sciences (Fryazino branch)

A method for reconstructing the characteristics of internal gravity waves (IGWs) based on the analysis of disturbances in the vertical profile of temperature, density, or buoyancy frequency (Brunt-Vaisala) in the planet's atmosphere has been developed. A threshold criterion for IGW identification has been formulated, which, if met, allows the analyzed fluctuations to be considered as wave manifestations. Application of the method to the analysis of radio occultation data from the CHAMP, GRACE, and COSMIC-1 satellite missions made it possible to identify wave events in the Earth's atmosphere and reconstruct key characteristics for the detected waves. An analysis of IGW activity in the lower stratosphere of the Arctic and Antarctic regions has been conducted. For this purpose, radio occultation data on temperature (Level 2) from the COSMIC-1 mission collected over the measurement period from July 2006 to March 2009 have been used. Seasonal distributions of the IGW potential energy density (an indicator of wave activity) have been determined and analyzed in the altitude range from 15 to 35 km. Keywords: radio occultation satellite measurements, Earth's lower stratosphere, internal gravity waves

Введение

Волновые процессы оказывают значительное влияние на циркуляцию, химический состав, тепловой режим и изменчивость атмосфер планет. Они также вносят большой

вклад в формирование сезонного водяного цикла в атмосфере Земли. В этом контексте можно отметить работы [1–6], в которых были исследованы внутренние атмосферные волны, тепловые приливы и планетарные волны. Важная роль внутренних гравитационных волн (ВГВ), в первую очередь, связана с обеспечением ими эффективного механизма переноса энергии и импульса с нижних уровней атмосферы на верхние. Источником генерации ВГВ в атмосфере могут являться: тепловые контрасты вблизи поверхности, топография, сдвиговая неустойчивость ветра, конвекция и фронтальные процессы. В атмосфере Земли, в отсутствие диссипации энергии, амплитуда волновых возмущений скорости ветра или температуры растет примерно экспоненциально с увеличением высоты и поэтому возмущения с малой амплитудой вблизи поверхности могут производить значительные эффекты на больших высотах, где происходит обрушение волн и передача волновой энергии и импульса в невозмущенный поток. Поскольку ВГВ являются характерной особенностью устойчиво стратифицированной атмосферы, то аналогичные эффекты можно ожидать в атмосферах Венеры и Марса.

Интерпретация наблюдений флуктуаций скорости ветра, температуры или плотности в атмосфере нередко основывается на модели широкого спектра волн, порождающих эти флуктуации. Спектральное описание подразумевает, что волновое поле флуктуаций состоит из многих компонент с различными масштабами. Во многих случаях экспериментальные спектры флуктуаций температуры, плотности или скорости ветра в атмосфере демонстрируют на фоне гладкого спектра узкие пики, которые указывают на квазипериодическую структуру возмущений в некотором диапазоне высот. Результаты прямых зондовых измерений в стратосфере Земли свидетельствуют о том, что формирование такой структуры может быть обусловлено распространением монохроматической волны, которая находится в состоянии насыщения вследствие сдвиговой неустойчивости в атмосфере [6, 7]. Нами разработан метод, который может быть использован для идентификации ВГВ и определения их параметров из данных о вертикальном профиле температуры или плотности в атмосфере планеты, не требующий какой-либо дополнительной информации, которой не содержалось бы в профиле [8–10]. Применение этого метода к радиозатменным данным дает возможность изучить волновую активность в атмосфере планеты в глобальном масштабе и определить ключевые параметры ВГВ, такие как собственная частота, горизонтальная и вертикальная длина волны, амплитуды горизонтальных и вертикальных возмущений скорости ветра, плотности кинетической, потенциальной и полной энергии, вертикальные потоки волновой энергии и импульса. Результаты мониторинга волновой активности могут быть полезными при построении численных моделей циркуляции атмосферы, включающих параметризацию волновых эффектов.

Мониторинг активности ВГВ в высокоширотной атмосфере Земли

Внутренние гравитационные 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 других средств. Однако только спутниковые наблюдения обеспечивают глобальный географический и временной охват зондируемых районов. Поэтому, радиозатменный мониторинг атмосферы Земли

является одним из эффективных способов таких наблюдений. На рис. 1 и 2 показаны высотные зависимости температуры T и квадрата частоты Брента-Вяйсяля N^2 , восстановленные из радиозатменных измерений миссии *CHAMP* (*Challenging Minisatellite Payload*) в полярной атмосфере Антарктики (рис. 1) и приполярной атмосфере Арктики (рис. 2). На панелях последовательно представлены вертикальные профили температуры (слева), нормированных вариаций температуры (средняя панель) и квадрата частоты Брента-Вяйсяля (справа). Сплошными и пунктирными линиями показаны исходные и средние профили, соответственно. Анализ данных о высотных зависимостях температуры в атмосфере Земли позволил нам идентифицировать волновые события и реконструировать характеристики соответствующих ВГВ. Их значения для двух зондируемых районов атмосферы над Арктикой и Антарктикой указаны в подписях к рис. 1 и 2.

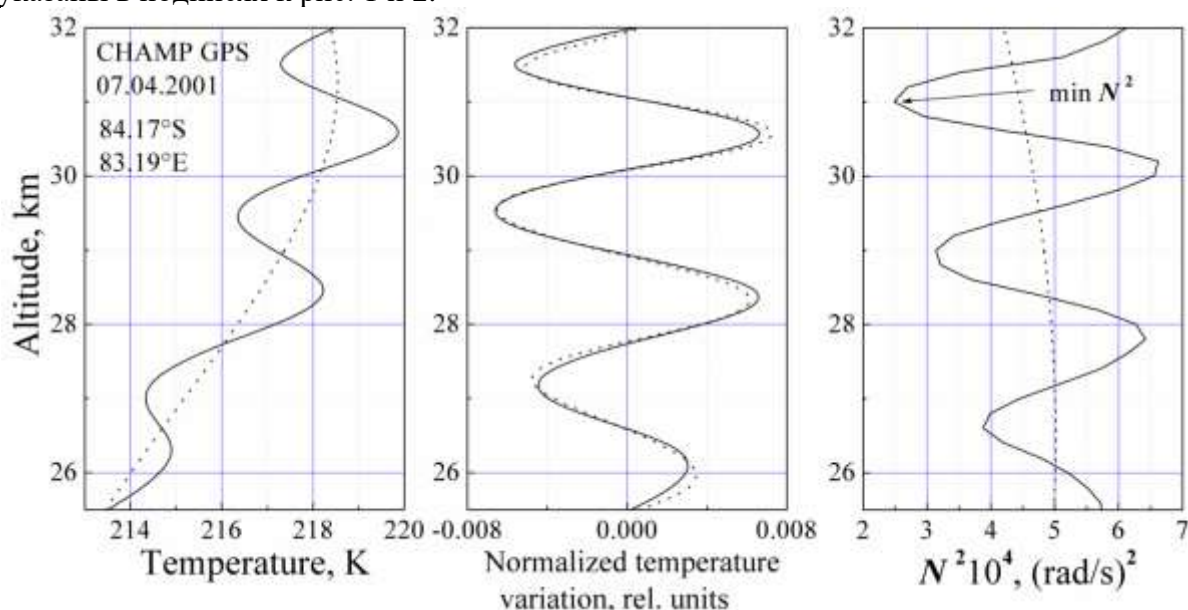


Рис. 1. Волновые возмущения, наблюдаемые из вертикального профиля температуры (7 апреля 2001 года) радиозатменной миссии *CHAMP* в полярной атмосфере над Антарктикой. Параметры внутренней волны: $\lambda_z=2.2$ км; $\lambda_h=1230$ км; $E=70$ Дж/кг; $p=E_k/E_p=30$; $E_p=2.3$ Дж/кг; $f/\omega=0.97$; $T^n=2\pi/\omega=11.6$ час; $a_e=0.41$; $|u'|=11.8$ м/с; $|v'|=11.5$ м/с

Совместная американо-тайваньская спутниковая миссия *FORMOSAT-3/COSMIC* (*COSMIC-1*) состоит из группировки шести спутников, каждый из которых имеет четыре *GPS*-антенны и вращается вокруг Земли по низкой орбите с высотой ~ 800 км. Главная цель миссии, стартовавшей в апреле 2006 года, заключалась в демонстрации ценности радиозатменных измерений при решении задачи улучшения оперативного численного прогноза погоды (numerical weather prediction - NWP). Улучшение прогноза погоды может быть достигнуто путем усвоения в имеющихся NWP-моделях данных об атмосферных характеристиках, полученных в режиме практически реального времени. Этими данными являются 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. Мы провели анализ активности ВГВ в полярных и приполярных районах атмосферы Земли, расположенных на широтах более 60° .

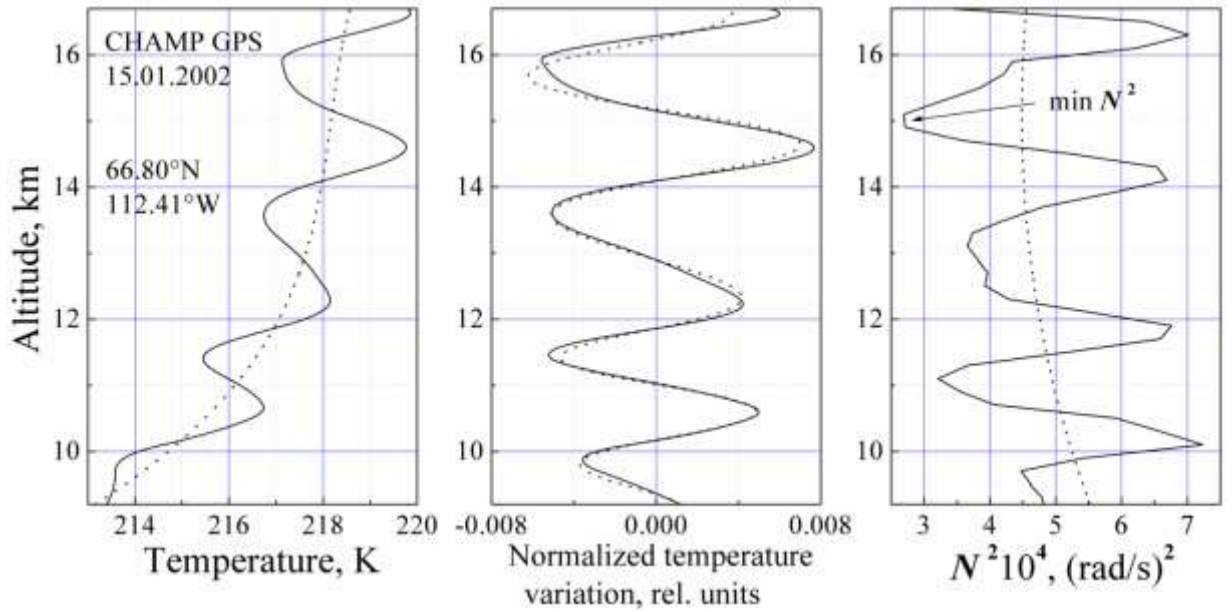


Рис. 2. Волновые возмущения, наблюдаемые из вертикального профиля температуры (15 января 2002 года) радиозатменной миссии CHAMP в приполярной атмосфере над Арктикой. Параметры внутренней волны: $\lambda_z=2.1$ км; $\lambda_h=1450$ км; $E=65$ Дж/кг; $p=E_h/E_p=41$; $E_p=1.5$ Дж/кг; $f/\omega=0.98$; $T''=2\pi/\omega=13$ час; $a_e=0.36$; $|u'|=11.4$ м/с; $|v'|=11.1$ м/с

Для этого были использованы радиозатменные данные о температуре (Level 2) миссии *COSMIC-1*, собранные за период с июля 2006 по март 2009 года. 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 глобальную морфологию активности ВГВ в полярной и приполярной стратосфере Земли.

Потенциальная энергия ВГВ на единицу массы E_p , выбранная нами в качестве индикатора волновой активности, определяется следующим образом [9]:

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

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-Вайсяля. Черта сверху в выражении (1) обозначает усреднение соответствующей величины по анализируемому интервалу высот. Используемые здесь радиозатменные данные о температуре (Level 2) имеют очень хорошее разрешение по высоте, что обеспечивает уникальную возможность изучения глобальной морфологии ВГВ в полярной стратосфере Земли. Точность восстановления показателя преломления составляет $< 0.2\%$ в интервале от ~ 10 км до ~ 20 км и понижается до значения 0.7% на высоте 30 км, а погрешность определения температуры лучше 0.5 К. 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 тропопавзы (~ 10 км), дают надежную информацию об активности ВГВ в полярной атмосфере [9]. 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 оригинального 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 волнами флуктуаций температуры, к вертикальным профилям применялась полосовая фильтрация с отсечкой на 2 и 10 км.

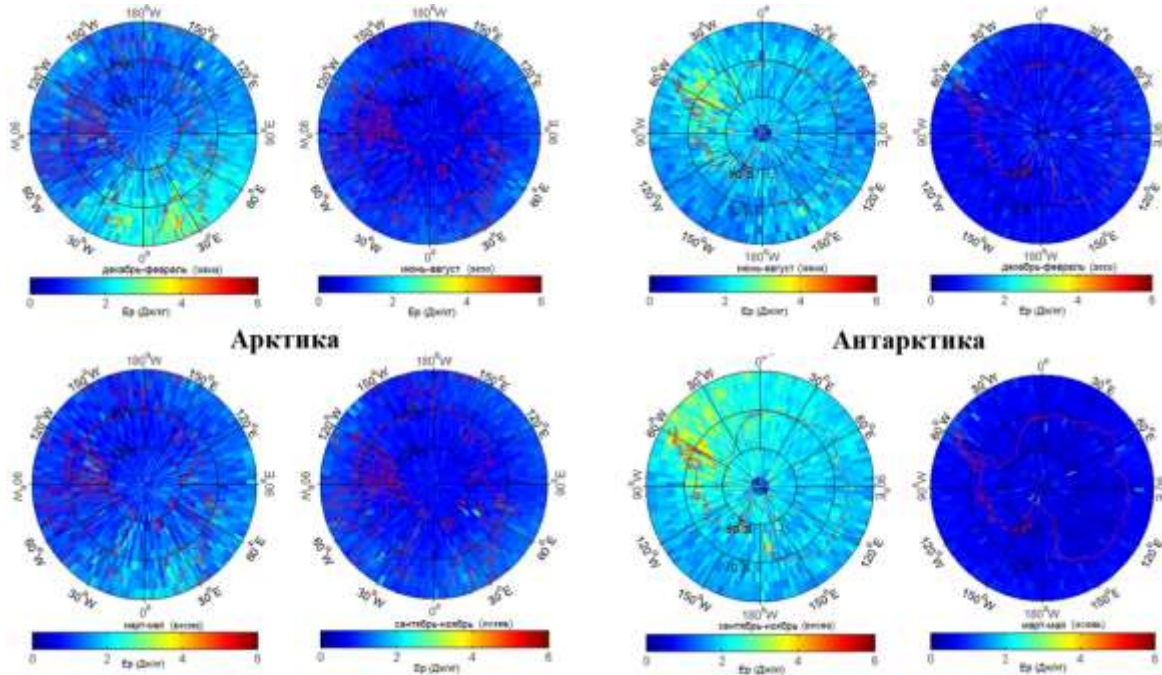


Рис. 3. Географические распределения месячных средних значений E_p для различных сезонов в 2006–2009 году, усредненных по интервалу 20–25 км в атмосфере Арктики (слева) и Антарктики (справа)

Пороговое ограничение для плотности потенциальной энергии внутренних волн E_p имеет вид:

$$E_p = \frac{1}{2} \frac{g^2}{N_b^2} \left(\frac{T'}{T_b} \right)^2 = \frac{1}{4} \frac{g^2}{N_b^2} \left| \frac{T'}{T_b} \right|^2 = \frac{N_b^2}{4m^2} \cdot \frac{g^2 m^2}{N_b^4} \cdot \left| \frac{T'}{T_b} \right|^2 = \frac{N_b^2}{4m^2} \cdot a_e^2 < \frac{N_b^2}{4m^2}. \quad (13)$$

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 четыре одинаковых интервала по 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 возможность получить соответственно месячные и сезонные средние оценки E_p для выбранной ячейки.

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. 3. 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° – 70° N и долготах 30° W– 90° E. В Арктическом регионе, повышенная волновая активность наблюдается, главным образом, над северной Атлантикой (Исландия) и над Скандинавией.

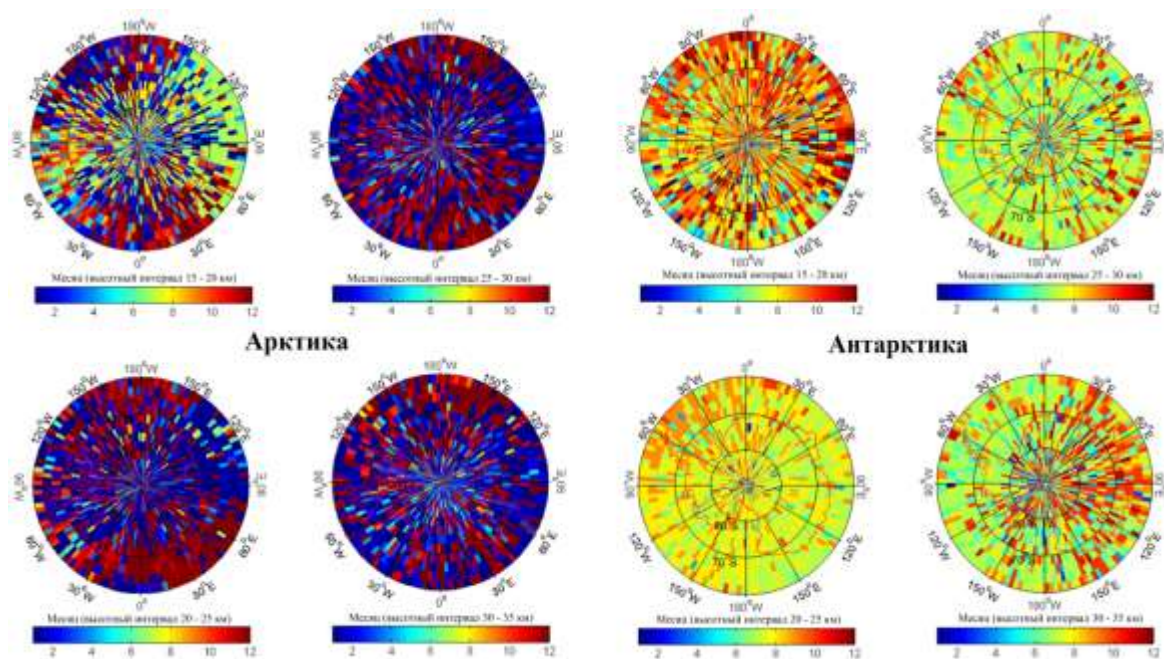


Рис. 4. Географические распределения месяцев наибольшей активности ВГВ для различных высотных интервалов в 2006–2009 году в атмосфере над Арктикой (слева) и Антарктикой (справа)

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° – 90° W, окружающих Антарктический полуостров. Часть указанных районов атмосферы (30° – 60° W) расположена над морем, а другая часть атмосферного кластера высокой активности ВГВ (60° – 90° W) находится над сушей. Расположение кластера высокой волновой активности в весенний период практически такое же, что и зимой, однако его размеры становятся больше.

На рис. 4 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.

Таким образом, мы исследовали активность атмосферных ВГВ на высотах 15–35 км, как в Арктическом, так и Антарктическом регионах используя базу радиозатменных данных *COSMIC-1* с июля 2006 по март 2009 года. С помощью температурных профилей мы вычисляли вертикальные профили средней температуры, квадрата частоты Брента-Вайсяля и флуктуаций температуры с длиной волны от 2 до 10 км. Затем определялась плотность потенциальной энергии волн E_p в интервалах высот 15–20 км, 20–25 км, 25–30 км, 30–35 км. Величины E_p были усреднены для каждого месяца и для каждого сезона в горизонтальных ячейках с размерами $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ по широте и по долготе. Плотность потенциальной энергии ВГВ увеличивается с высотой, вплоть до 35 км как в северном, так и в южном полушариях. Найдено, что существенное увеличение E_p зимой и весной обнаруживается над некоторыми горными массивами, такими как Скандинавия, Исландия, Гренландия, Антарктический полуостров и Трансантарктические горы (рис. 3). Поэтому орографические эффекты являются, по-видимому, одним из основных механизмов генерации ВГВ в полярных регионах. Однако линия визирования радиозатменных наблюдений *COSMIC* во всех районах была ориентирована преимущественно вдоль оси север-юг, что дает орографическим волнам преимущество при их регистрации. Это обстоятельство предполагает несколько завышенную оценку активности орографических волн в данном случае по сравнению со случаем изотропного источника внутренних волн.

Заключение

Разработан метод реконструкции характеристик внутренних гравитационных волн по данным анализа возмущений вертикального профиля температуры, плотности или частоты Брента-Вайсяля в атмосфере планеты. Сформулирован пороговый критерий идентификации ВГВ, в случае выполнения которого анализируемые флуктуации могут рассматриваться как волновые проявления. Применение метода к анализу радиозатменных данных спутниковых миссий *CHAMP*, *GRACE* и *COSMIC-1* позволило идентифицировать волновые события в атмосфере Земли и реконструировать ключевые характеристики для обнаруженных волн. Проведен анализ активности ВГВ в нижней стратосфере районов Арктики и Антарктики. Для этого были использованы радиозатменные данные о температуре (Level 2) миссии *COSMIC-1*, собранные за период измерений с июля 2006 по март 2009 года. Определены и проанализированы сезонные распределения плотности потенциальной энергии ВГВ в интервале высот от 15 до 35 км.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

Литература

1. Creasey J.E., Forbes J.M., Hinson D.P. Global and seasonal distribution of gravity wave activity in Mars' lower atmosphere derived from MGS radio occultation data // *Geophys. Res. Lett.* 2006. V. 33. L01803, <https://doi.org/10.1029/2005GL024037>.
2. Fritts D.C., Wang L., Tolson R.H. Mean and gravity wave structures and variability in the Mars upper atmosphere inferred from Mars Global Surveyor and Mars Odyssey aerobraking densities // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. A12304, <https://doi.org/10.1029/2006JA011897>.

3. Hinson D.P., Tyler G.L., Hollingsworth J.L., Wilson R.J. Radio occultation measurements of forced atmospheric waves on Mars // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. E1. P. 1463–1480.
4. Wilson R.J. Evidence for nonmigrating thermal tides in the Mars upper atmosphere from the Mars Global Surveyor Accelerometer Experiment // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29. № 7, <https://doi.org/10.1029/2001GL013975>.
5. Withers P. Mars Global Surveyor and Mars Odyssey accelerometer observations of the Martian upper atmosphere during aerobraking // *Geophys. Res. Lett.* 2006. V. 33. L02201, <https://doi.org/10.1029/2005GL024447>.
6. Cot C., Barat J. Wave-turbulence interaction in the stratosphere: a case study // *J. Geophys. Res.* 1986. V. 91. D2. P. 2749–2756.
7. Fritts D.C., Alexander M.J. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere // *Rev. Geophys.* 2003. V. 41. № 1. 1003, <https://doi.org/10.1029/2001RG000106>.
8. 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, <https://doi.org/10.1029/2007JD008920>.
9. 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. № 10. P. 2153–2162, <https://doi.org/10.5194/amt-4-2153-2011>.
10. 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 // *Космич. исслед.* 2012. Т. 50. № 1. С. 23–34.