

Определение параметров внутренних гравитационных  
волн по результатам обработки и анализа  
радиозатменных измерений спутниковых миссий  
*CHAMP* и *COSMIC-1* в нижней стратосфере Земли

***Губенко В.Н., Андреев В.Е., Кириллович И.А.***

*ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, пл. акад. Б.А. Введенского,  
дом 1, 141190 Фрязино, Московская обл., Россия*



*E-mail: [gubenko@fireras.su](mailto:gubenko@fireras.su)*

**Двадцать третья международная конференция «СОВРЕМЕННЫЕ  
ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ  
КОСМОСА»**

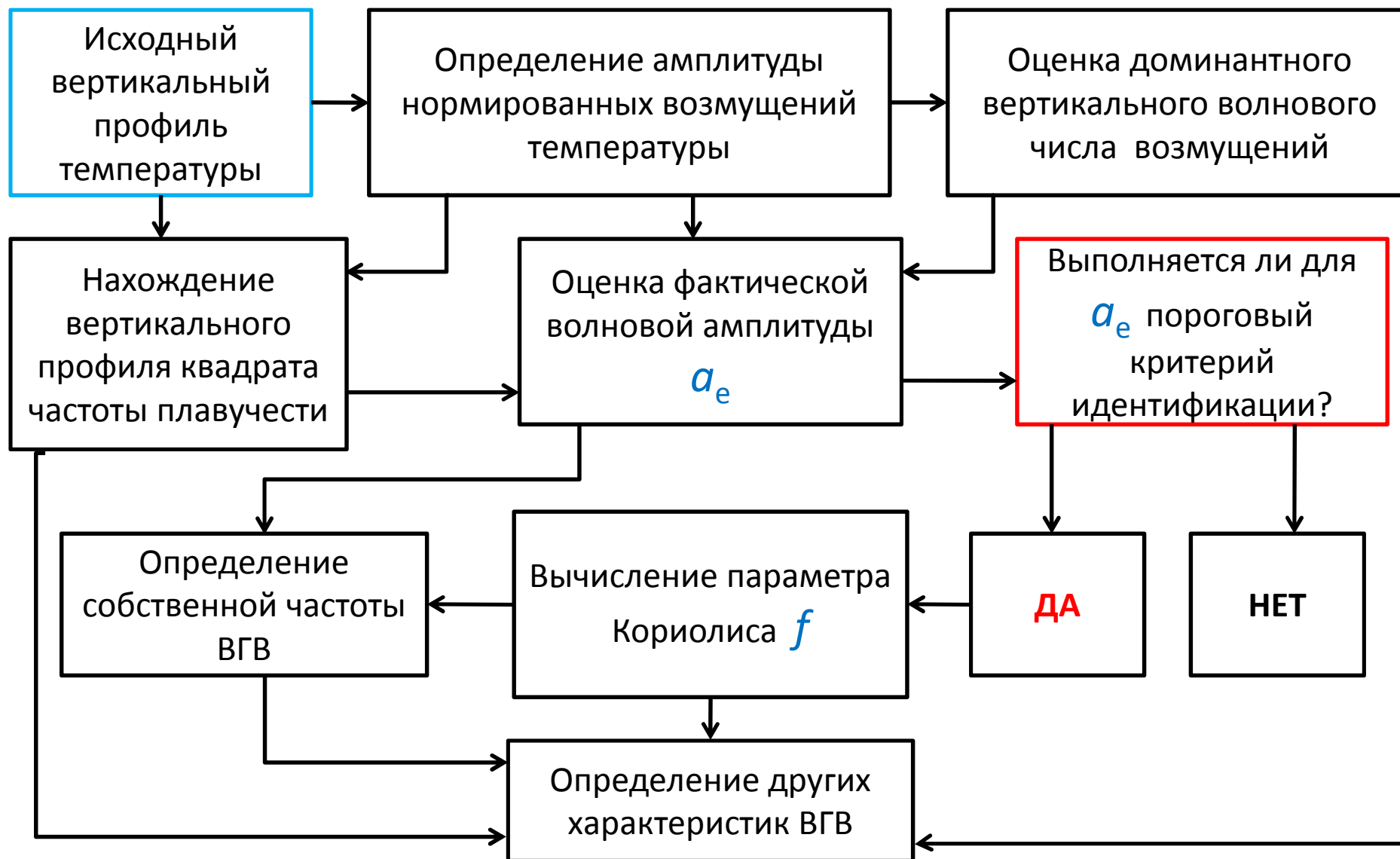
**10 - 14 ноября 2025 года, ИКИ РАН, Москва**

**Введение:** Внутренние гравитационные волны (ВГВ) 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 радиозатменные наблюдения обеспечивают глобальный географический и временной охват зондируемых районов.

Ранее нами был разработан метод идентификации ВГВ и определения волновых характеристик из данных о вертикальном профиле температуры, плотности или частоты Брента-Вяйсяля в атмосфере планеты (*Gubenko et al.*, 2008, 2011; *Губенко и др.*, 2012, 2015). Сформулирован дискриминационный пороговый критерий в случае выполнения которого анализируемые флуктуации могут рассматриваться как проявления ВГВ. Применение указанного метода к радиозатменным данным дает возможность изучить волновую активность в атмосфере Земли 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.

Целью работы является восстановление характеристик ВГВ и изучение волновой активности в нижней стратосфере Арктики и Антарктики по результатам анализа вертикальных профилей температуры, восстановленных из радиозатменных измерений.

# Схема реконструкции характеристик ВГВ на основе анализа вертикального профиля температуры в атмосфере планеты



# Метод идентификации дискретных волновых событий

Условие для внутренних волн с промежуточными и низкими частотами

$$N_b^2 \gg \omega^2 > f^2$$

Поляризационное уравнение для ВГВ

$$|u'| = \frac{g}{N_b} \cdot \frac{|T'|}{T_b} \cdot \left(1 - f^2/\omega^2\right)^{-1/2}$$

Квадрат частоты Брента-Вяйсяля (частота плавучести)

$$N_b^2 = \frac{g}{T_b} \cdot \left( \frac{\partial T_b}{\partial z} + \frac{g}{c_p} \right)$$

Дискриминационный пороговый критерий для идентификации ВГВ

$$1 > a = a_e > 0$$

Дисперсионное соотношение для ВГВ

$$|c_h - \bar{u}|^2 = \frac{\omega^2}{k_h^2} = \frac{N_b^2}{m^2} \cdot \frac{1}{1 - f^2/\omega^2}$$

Пороговая волновая амплитуда для сдвиговой неустойчивости (Fritts, 1989)

$$a = \frac{|u'_{sat}|}{|c_h - \bar{u}|} = \frac{2 \cdot (1 - f^2/\omega^2)^{1/2}}{1 + (1 - f^2/\omega^2)^{1/2}}$$

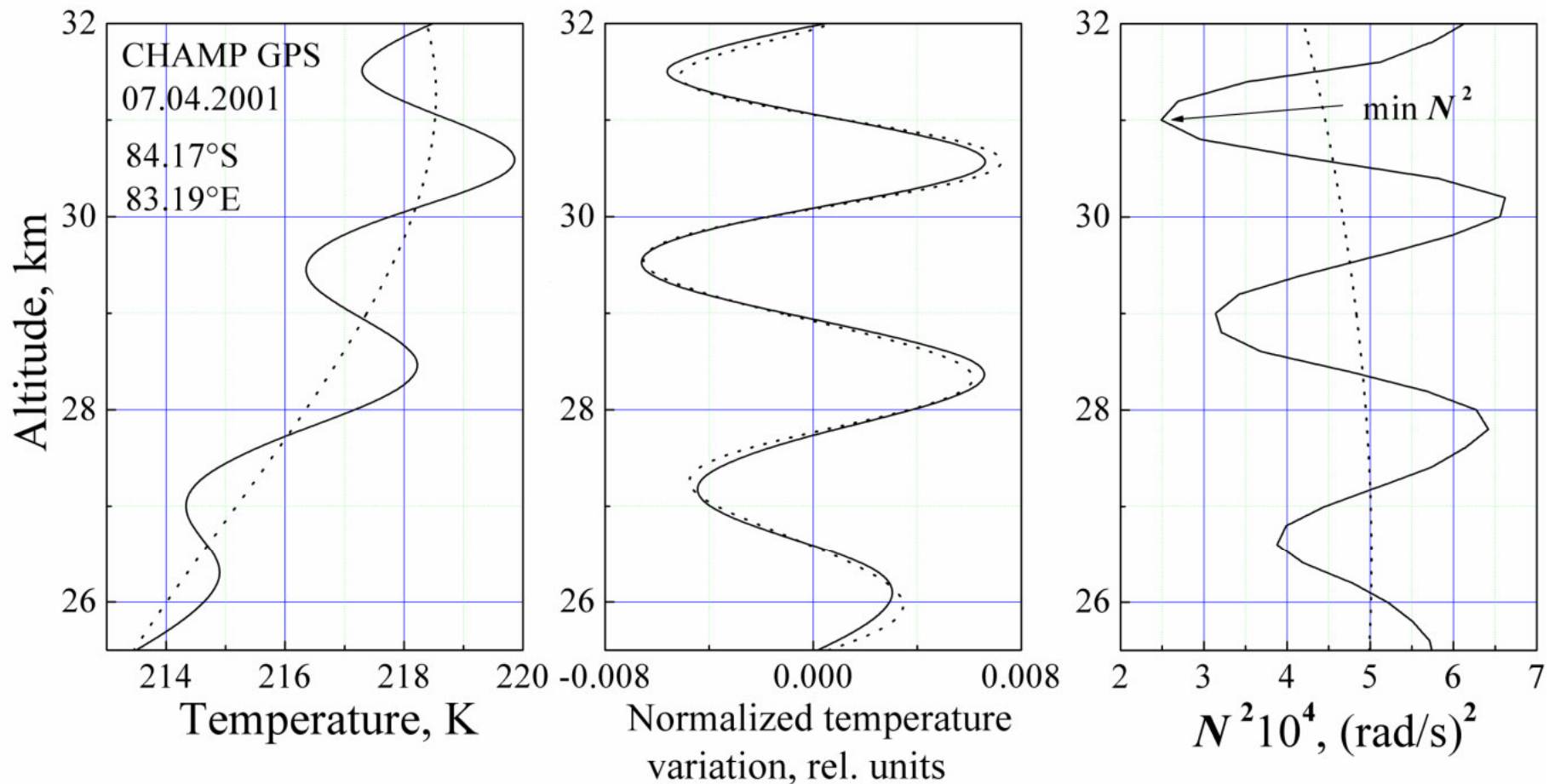
Фактическая (реальная) амплитуда волны, определяемая из эксперимента

(Gubenko et al., 2008, 2011; Губенко и др., 2012, 2015)

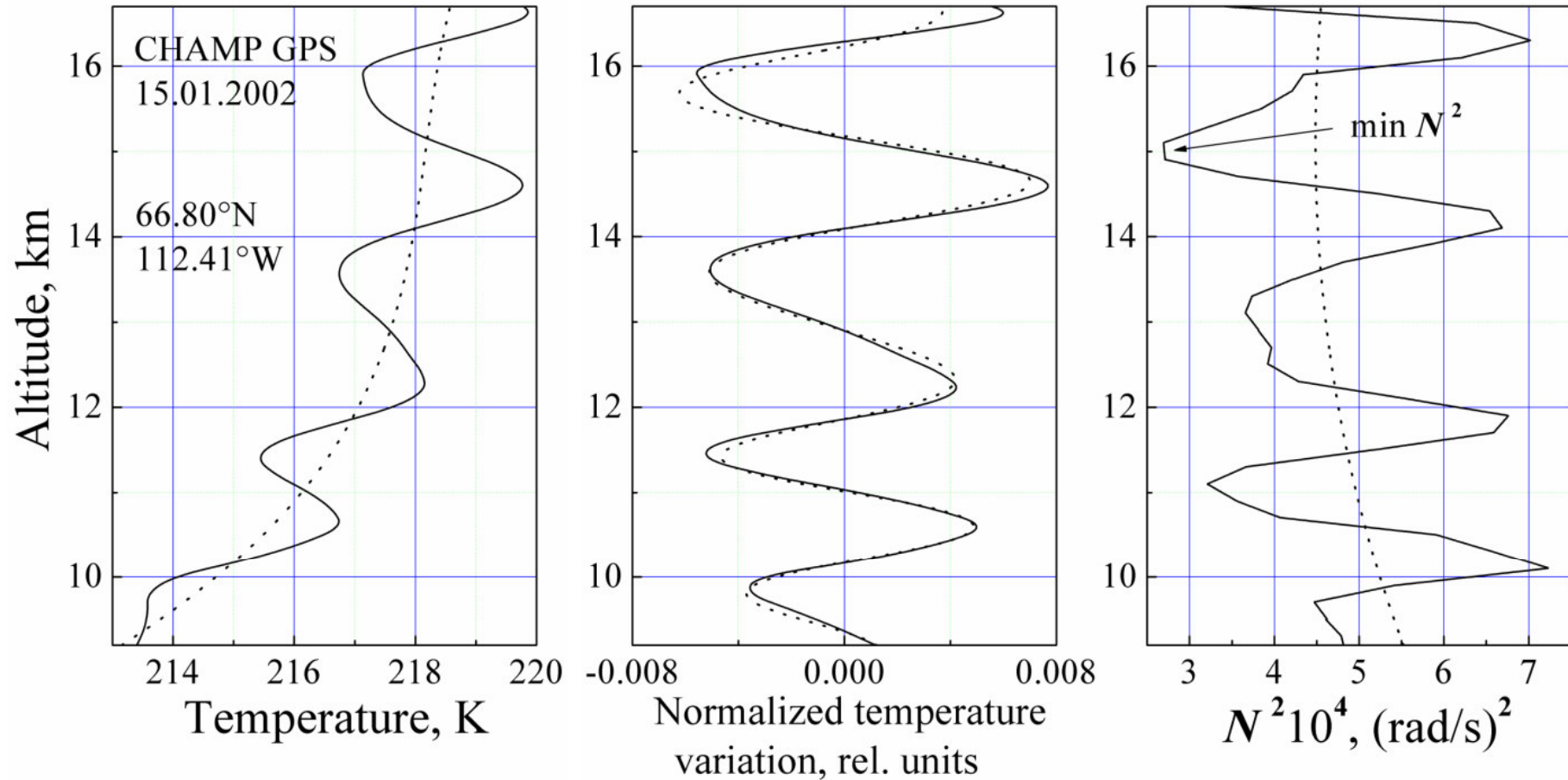
$$a_e = \frac{|u'|}{|c_h - \bar{u}|} = \frac{g|m|}{N_b^2} \cdot \frac{|T'|}{T_b} = A_{N^2}^{\text{rel}} = 1 - \frac{N_{\min}^2}{N_b^2}$$

Параметр Кориолиса (инерционная частота)

$$f = 2\Omega \cdot \sin \varphi$$



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



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

## Потенциальная энергия ВГВ на единицу массы $E_p$ как индикатор волновой активности в стратосфере Земли

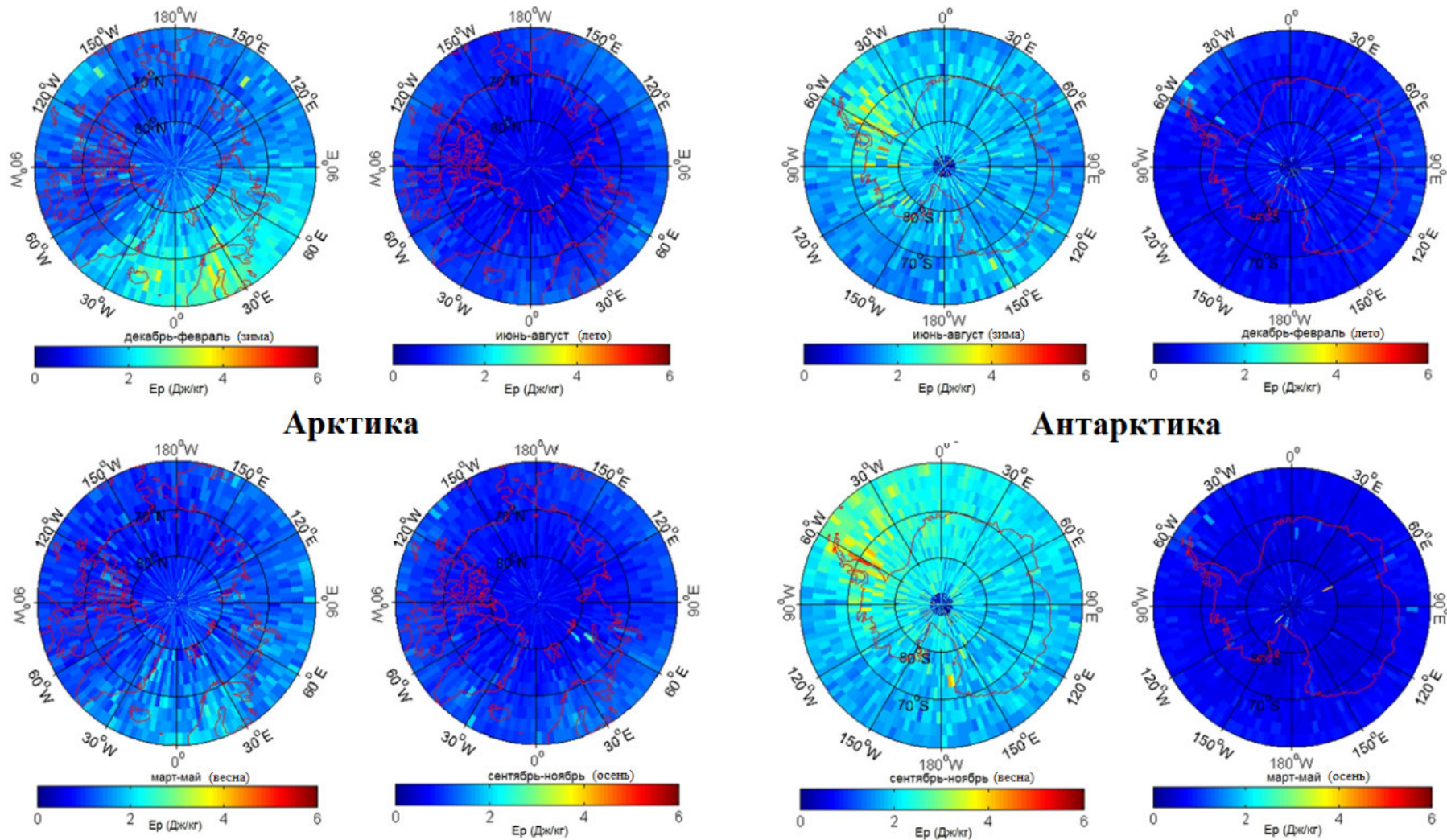
Потенциальная энергия ВГВ на единицу массы  $E_p$ , выбранная нами в качестве индикатора волновой активности, определяется следующим образом (*Gubenko et al.*, 2011):

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

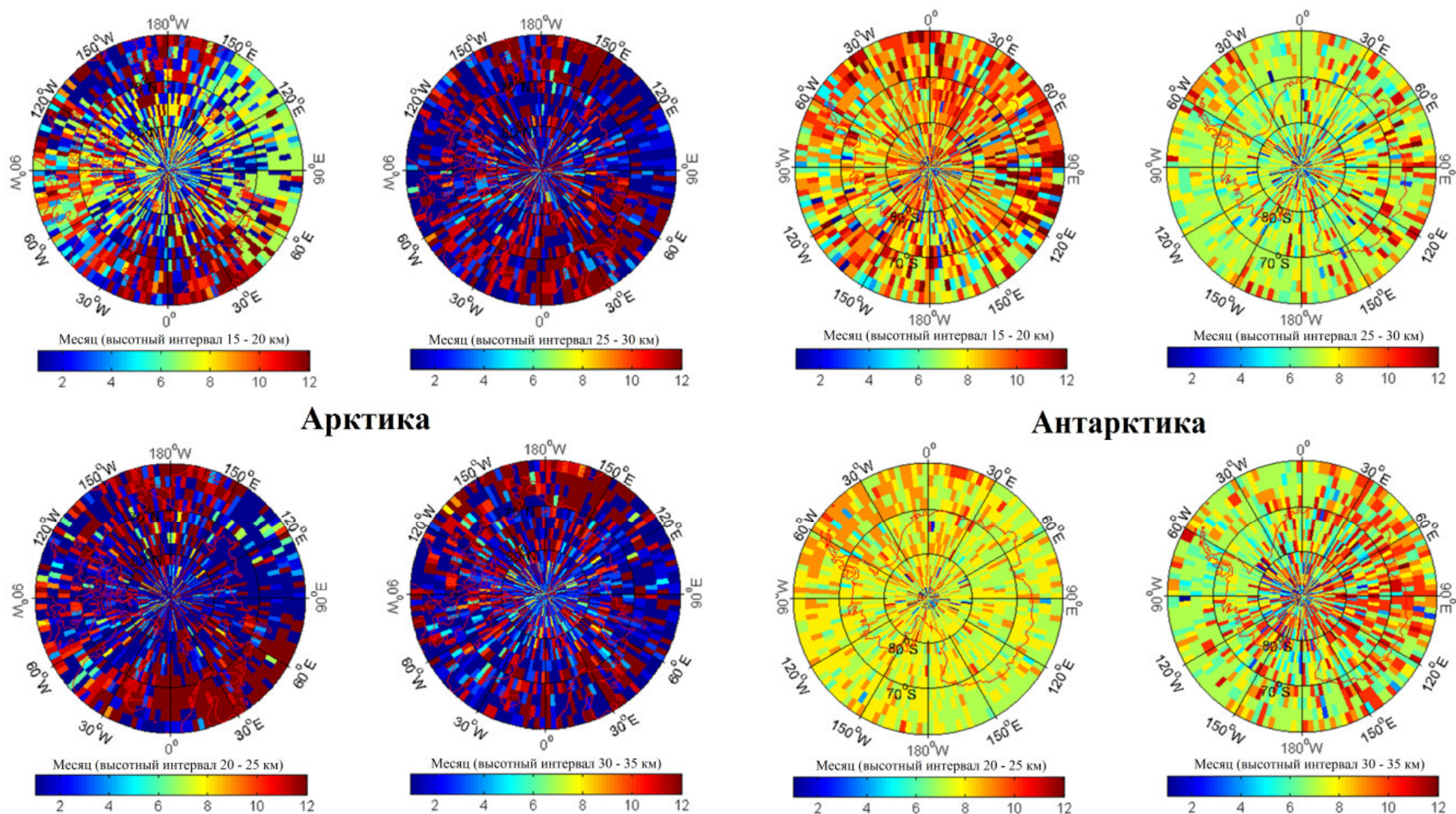
где  $g$  – ускорение свободного падения,  $T_b$  – невозмущенная (средняя) температура,  $|T'|/T_b$  – амплитуда нормированных возмущений температуры,  $N_b$  – средняя величина частоты Брента-Вяйсяля. Анализ потенциальной энергии  $E_p$  проводится в стратосфере Земли по интервалу высот от 15 до 35 км.

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

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



**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).



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

## Заключение:

На основе анализа радиозатменных данных о температуре (Level 2) миссии *COSMIC-1*, собранных за почти трехлетний период с июля 2006 по март 2009 года изучена глобальная морфология ВГВ в стратосфере Арктики и Антарктики. Здесь волновая активность является сильной в зимний и весенний периоды и слабой летом и осенью. Максимальные значения плотности потенциальной энергии  $E_p$  внутренних волн в стратосфере Арктики достигаются в зимний период. Кластер значительной волновой активности охватывает атмосферу, расположенную на широтах  $60^{\circ}$ – $70^{\circ}$ N и долготах  $30^{\circ}$ W– $90^{\circ}$ E. В Арктическом регионе, повышенная волновая активность наблюдается, главным образом, над северной Атлантикой (Исландия) и над Скандинавией. Волны с большой потенциальной энергией обнаруживаются зимой в атмосферных районах с долготой  $30^{\circ}$ – $90^{\circ}$ W, окружающих Антарктический полуостров. Часть указанных районов ( $30^{\circ}$ – $60^{\circ}$ W) расположена над морем, а другая часть кластера высокой активности ВГВ ( $60^{\circ}$ – $90^{\circ}$ W) находится над сушей. Расположение кластера высокой волновой активности в весенний период практически такое же, что и зимой, однако его размеры становятся больше. 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.

На высотах от 15 до 35 км в атмосфере Арктики, максимальная активность ВГВ наблюдается в период с ноября по февраль. В Антарктике, для указанного интервала 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.

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

### **Литература**

- Fritts D.C.* A review of gravity wave saturation processes, effects, and variability in the middle atmosphere // *Pure Appl. Geophys.* 1989. Vol. 130. P. 343–371.
- 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
- 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.
- 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.
- 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.

**Спасибо за внимание!**