

# Радиозатменный спутниковый мониторинг активности внутренних волн в атмосферах планет (на конкурс)

*Кириллович И.А., Губенко В.Н.*

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

*e-mail: [sabersecretmail@gmail.com](mailto:sabersecretmail@gmail.com)*

Шестнадцатая Всероссийская открытая конференция  
“Современные проблемы дистанционного зондирования  
Земли из космоса”

12 - 16 ноября 2018 года, Москва



# Введение

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]. 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, 2016а, б].

Метод идентификации дискретных волновых событий и реконструкции характеристик ВГВ [Gubenko et al., 2008, 2011, 2018; Губенко и др., 2012, 2015, 2016а, в; Губенко, Кириллович, 2018] получил широкое признание и успешно применяется при исследовании волновых процессов в атмосферах планет. В частности, авторы работы [Rechou et al., 2014] убедительно продемонстрировали, что данные численного моделирования, а также анализ одновременных радарных и зондовых измерений в атмосфере Земли показывают высокую эффективность метода и хорошую надежность получаемых на его основе научных результатов.

**Цель работы:** демонстрация и обсуждение результатов радиозатменного спутникового мониторинга активности внутренних волн на основе анализа вертикальных профилей температуры в атмосферах Земли и Марса.

# 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

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

Квадрат частоты Брента-Вяйсяля (частота плавучести)

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

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

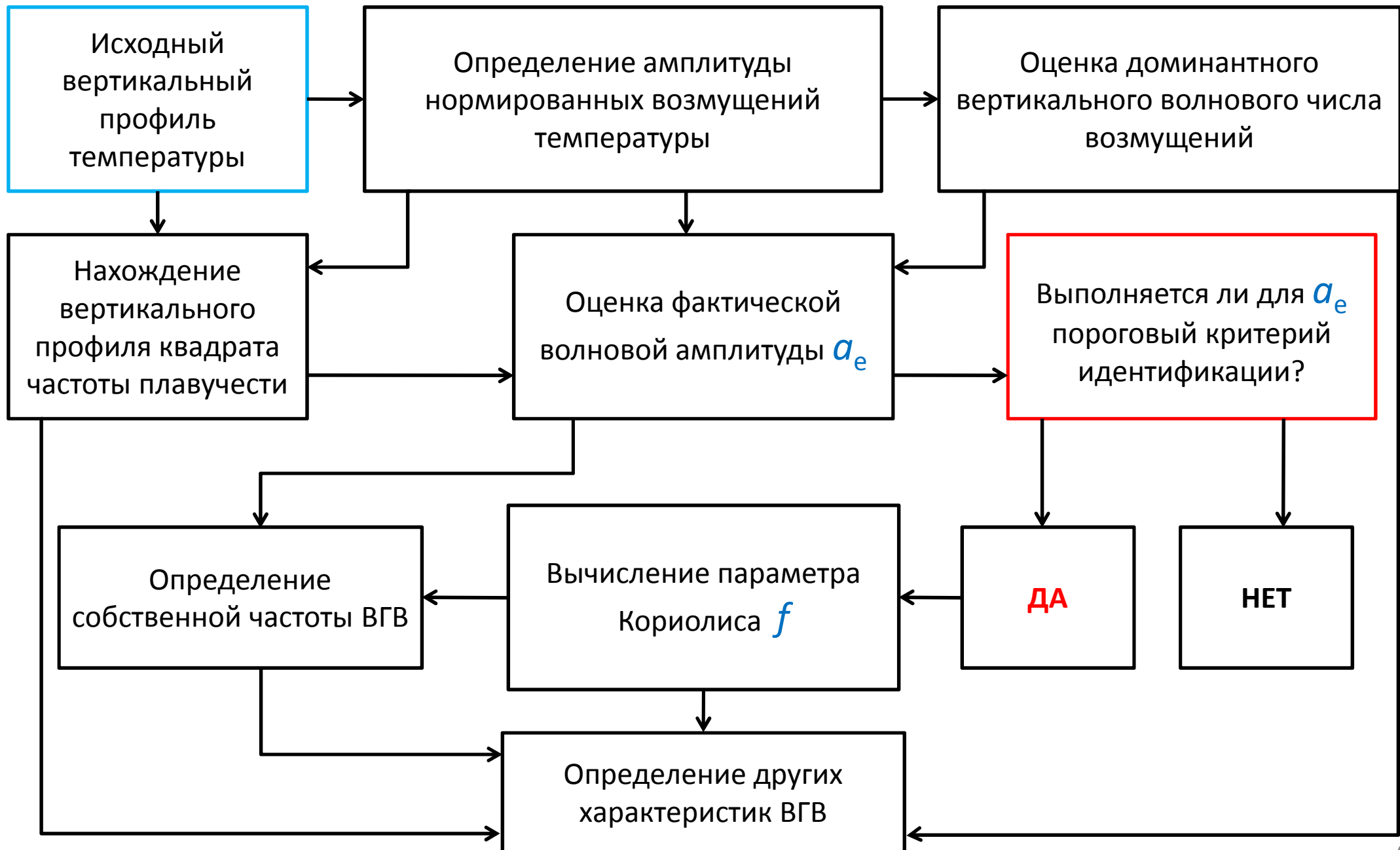
[Gubenko et al., 2008, 2011; Губенко и др., 2012, 2015]

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

Параметр Кориолиса (инерционная частота)

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

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





# Определяемые характеристики ВГВ [Gubenko et al., 2008]

*Собственная частота внутренней волны*

$$\omega = \frac{f}{2} \cdot \frac{2 - a_e}{(1 - a_e)^{1/2}}$$

*Горизонтальное волновое число*

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

*Собственная горизонтальная фазовая скорость*

$$|C_{ph}^{in}| = |c_h - \bar{u}| = \frac{N_b}{|m|} \cdot \frac{2 - a_e}{a_e} = \frac{\lambda_z N_b}{2\pi} \cdot \frac{2 - a_e}{a_e}$$

*Горизонтальная длина волны*

$$\lambda_h = \frac{2\pi}{|k_h|} = 4\pi \frac{N_b}{f} \cdot \frac{(1 - a_e)^{1/2}}{a_e \cdot |m|} = 2 \frac{\lambda_z N_b}{f} \cdot \frac{(1 - a_e)^{1/2}}{a_e}$$

$$|C_{pz}^{in}| = \frac{\omega}{|m|} = \frac{f}{2|m|} \cdot \frac{2 - a_e}{(1 - a_e)^{1/2}} = \frac{\lambda_z f}{4\pi} \cdot \frac{2 - a_e}{(1 - a_e)^{1/2}}$$

*Собственная вертикальная фазовая скорость волны*

$$|w'| = \frac{|k_h|}{|m|} \cdot |u'| = \frac{f \cdot a_e}{2|m|} \cdot \frac{2 - a_e}{(1 - a_e)^{1/2}} = \frac{\lambda_z f \cdot a_e}{4\pi} \cdot \frac{2 - a_e}{(1 - a_e)^{1/2}}$$

*Амплитуда вертикальных возмущений скорости ветра*

*Амплитуда горизонтальных возмущений скорости ветра*

$$|u'| = a_e |c_h - \bar{u}| = \frac{N_b}{|m|} \cdot (2 - a_e) = \frac{\lambda_z N_b}{2\pi} \cdot (2 - a_e)$$

$$|v'| = \frac{f}{\omega} \cdot |u'| = 2 \frac{N_b}{|m|} (1 - a_e)^{1/2} = \frac{\lambda_z N_b}{\pi} (1 - a_e)^{1/2}$$

↑  
*в направлении горизонтальной компоненты волнового вектора*

↑  
*в направлении перпендикулярном горизонтальной компоненты волнового вектора*

# Энергетические характеристики ВГВ [Gubenko et al., 2011]

*Тангенс угла наклона волнового вектора к горизонтальной плоскости*

$$\tan \varphi' = \frac{|m|}{|k_h|} = \frac{\lambda_h}{\lambda_z}$$

*Кинетическая энергия волны на единицу массы*

$$E_k = \frac{1}{2} \left[ \overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2} \right] = E \cdot \frac{1 + (f / \omega)^2 \sin^2 \varphi'}{2}$$

*Потенциальная энергия волны на единицу массы*

$$E_p = \frac{1}{2} \frac{g^2}{N_b^2} \left( \frac{T'}{T_b} \right)^2 = \frac{1}{4} \frac{g^2}{N_b^2} \left| \frac{T'}{T_b} \right|^2 = E \cdot \frac{1 - (f / \omega)^2 \sin^2 \varphi'}{2}$$

*Полная энергия волны на единицу массы*

$$E = E_k + E_p = \frac{1}{2} |w'|^2 (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi') = \frac{1}{2} (|w'|^2 + |u'|^2)$$

*Отношение плотности кинетической энергии к потенциальной*

$$p = \frac{E_k}{E_p} = \frac{\omega^2 + f^2 \sin^2 \varphi'}{\omega^2 - f^2 \sin^2 \varphi'} = 1 + 2 \frac{f^2}{N_b^2} \operatorname{tg}^2 \varphi'$$

*Собственная горизонтальная групповая скорость волны*

$$|C_{gh}^{in}| = \left| \frac{\partial \omega}{\partial k_h} \right| = |C_{ph}^{in}| \cdot \left( 1 - \frac{f^2}{\omega^2} \right) = \frac{N_b}{|m|} \cdot \sqrt{1 - \frac{f^2}{\omega^2}}$$

*Собственная вертикальная групповая скорость волны*

$$|C_{gz}^{in}| = \left| \frac{\partial \omega}{\partial m} \right| = |C_{pz}^{in}| \cdot \left( 1 - \frac{f^2}{\omega^2} \right) = \frac{|k_h| N_b}{m^2} \cdot \sqrt{1 - \frac{f^2}{\omega^2}}$$



# Потоки волновой энергии и горизонтального импульса

[Gubenko et al., 2011]

$$\left| \frac{C_{gz}^{in}}{C_{gh}^{in}} \right| = \left| \frac{C_{pz}^{in}}{C_{ph}^{in}} \right| = \left| \frac{k_h}{m} \right| = \frac{\lambda_z}{\lambda_h} = \frac{\omega}{N_b} \cdot \sqrt{1 - \frac{f^2}{\omega^2}}$$

*Отношение вертикальной групповой (фазовой) скорости к горизонтальной*

$$|F_z| = |C_{gz}^{in}| \cdot E$$

*Вертикальный поток волновой энергии*

$$|F_h| = |C_{gh}^{in}| \cdot E$$

*Горизонтальный поток волновой энергии*

*Полный вертикальный поток горизонтального импульса внутренней волны*

$$|F_{ph}| = \sqrt{(\overline{u' \cdot w'})^2 + (\overline{v' \cdot w'})^2} = |\overline{u' \cdot w'}| = \frac{|u'| \cdot |w'|}{2} = \left| \frac{k_h}{m} \right| \cdot \frac{|u'|^2}{2}$$

# Погрешности вычисления реальной волновой амплитуды $a_e$

[Gubenko et al., 2008; Губенко и др., 2012]

$$a_e = \frac{|u'|}{|c - \bar{u}|} = \frac{g|m|}{N_b^2} \cdot \frac{|T'|}{T_b} = \frac{2\pi \cdot g}{\lambda_z N_b^2} \cdot \frac{|T'|}{T_b} = a = \frac{2(1 - f^2/\omega^2)^{1/2}}{1 + (1 - f^2/\omega^2)^{1/2}} \quad \text{Реальная волновая амплитуда } a_e$$

**Относительная погрешность определения реальной (фактической) волновой амплитуды**

$$X = \frac{\delta a_e}{a_e} \approx \left[ \left( \frac{\delta |T'|}{|T'|} \right)^2 + \left( \frac{\delta \lambda_z}{\lambda_z} \right)^2 + \left( \frac{\delta N_b^2}{N_b^2} \right)^2 \right]^{1/2} \approx \left[ \frac{\lambda_z}{L} \left( \frac{\delta T}{|T'|} \right)^2 + \frac{\lambda_z}{L} \left( \frac{\delta h}{\lambda_z} \right)^2 + \left( \frac{\delta N_b^2}{N_b^2} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$1 > a = a_e > 0$  **Теоретические ограничения на пороговую амплитуду  $a$**

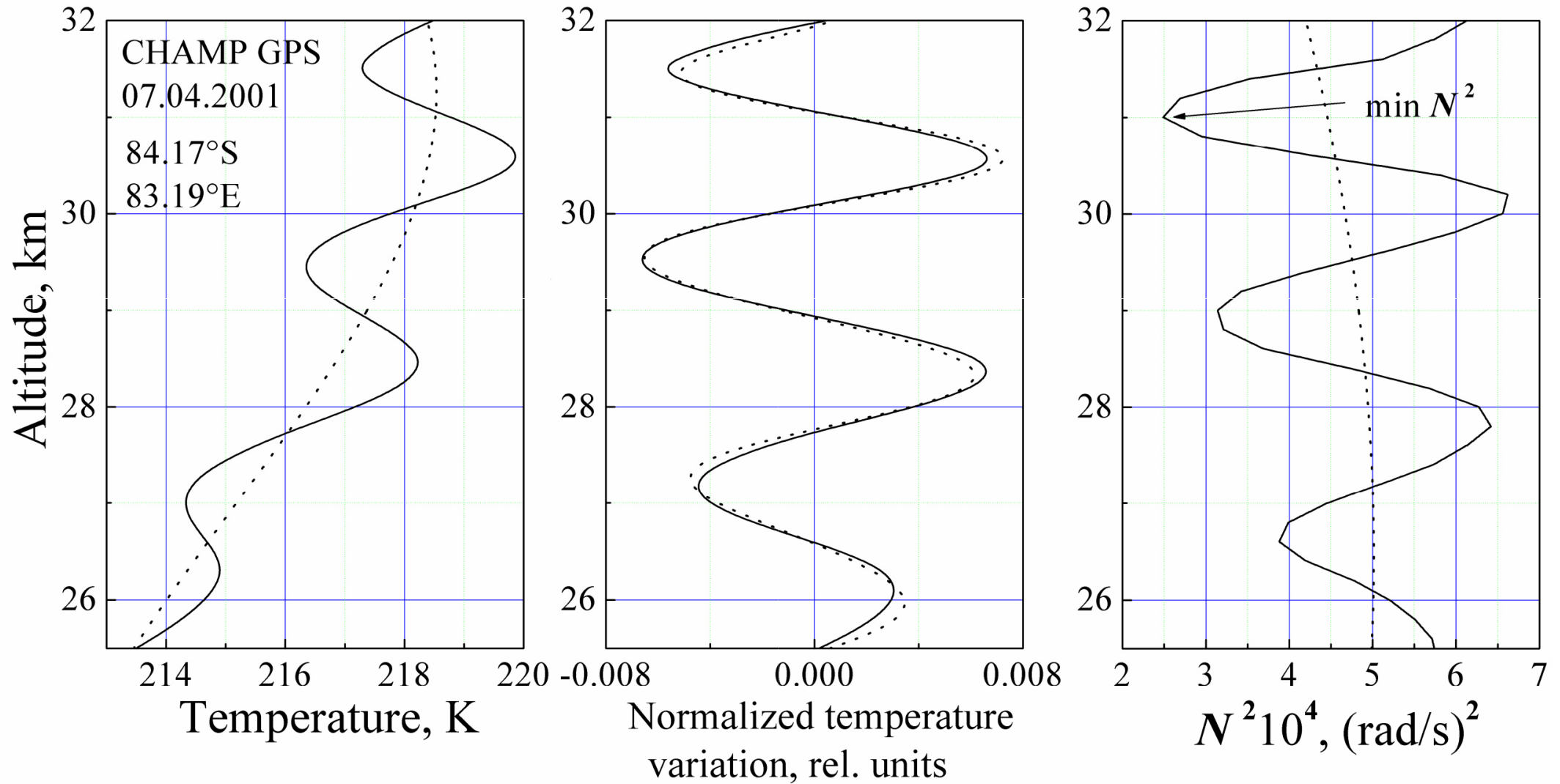
**Реальные ограничения, налагаемые на фактическую волновую амплитуду  $a_e$ , учитывающие погрешности эксперимента**

$$1 > a_e + \delta a_e > a_e > a_e - \delta a_e > 0 \Leftrightarrow 1 > (1+X) a_e > a_e > (1-X) a_e > 0$$

**Минимально возможная амплитуда возмущений температуры, позволяющая идентифицировать ВГВ**

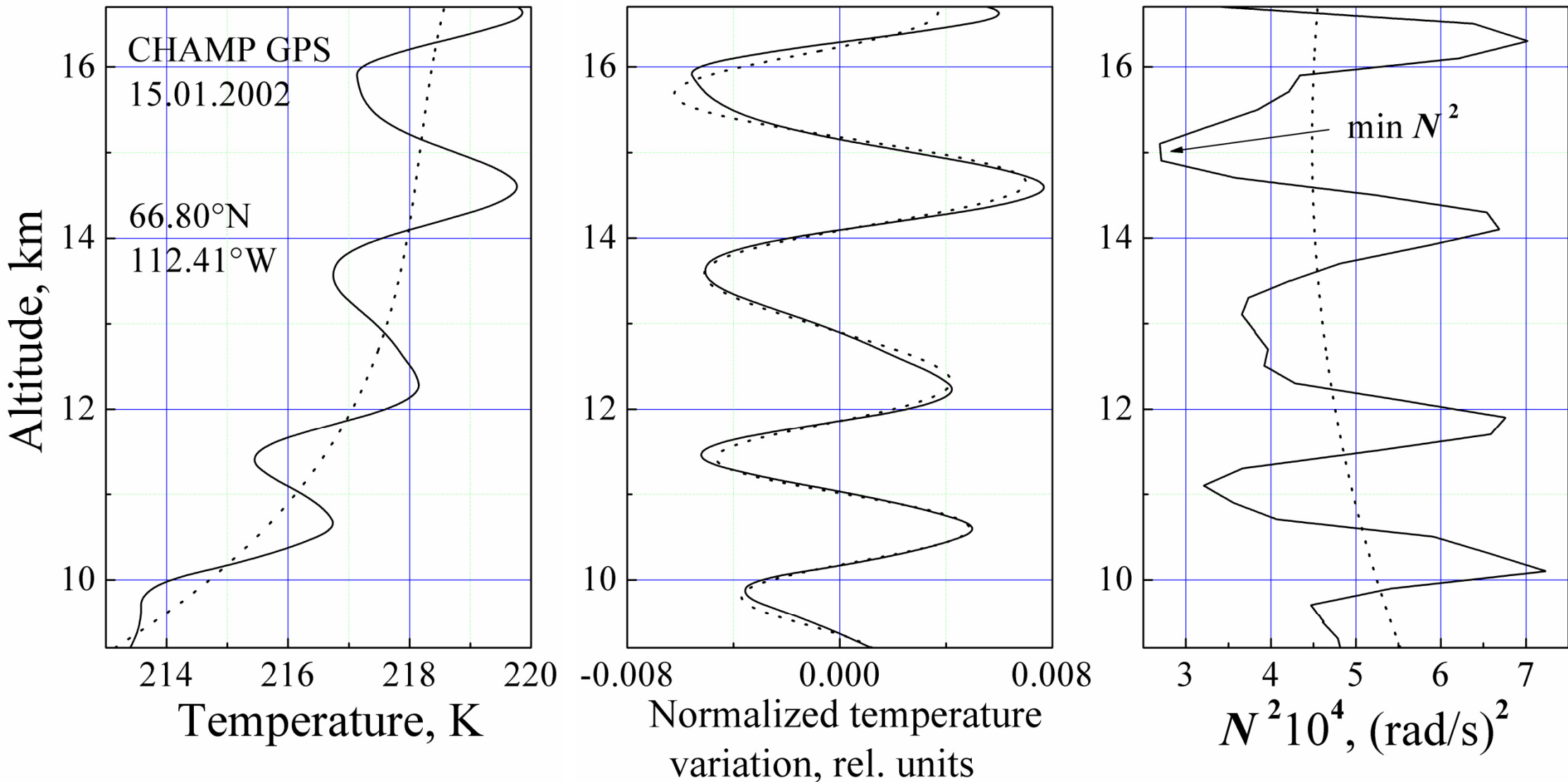
$$\min |T'| = \delta T / [L/\lambda_z - (\delta h / \lambda_z)^2]^{1/2}$$

# Радиозатменные исследования ВГВ в полярной атмосфере Земли



**Рис. 1.** Волновые возмущения, обнаруженные в атмосфере высоких широт Южного полушария Земли на основе анализа вертикального профиля температуры (07 апреля 2001 года) радиозатменной миссии *CHAMP*. На панелях последовательно представлены вертикальные профили: температуры (слева), нормированных вариаций температуры (средняя панель), квадрата частоты Брента-Вяйсяля  $N^2$  (справа). Сплошными и пунктирными линиями обозначены исходные и средние профили, соответственно.

# Радиозатменные исследования ВГВ в приполярной атмосфере Земли



**Рис. 2.** Волновые возмущения, найденные в атмосфере высоких широт Северного полушария Земли по результатам анализа вертикального профиля температуры (15 января 2002 года) радиозатменной миссии *CHAMP*. Здесь обозначения такие же, как и на Рис. 1.

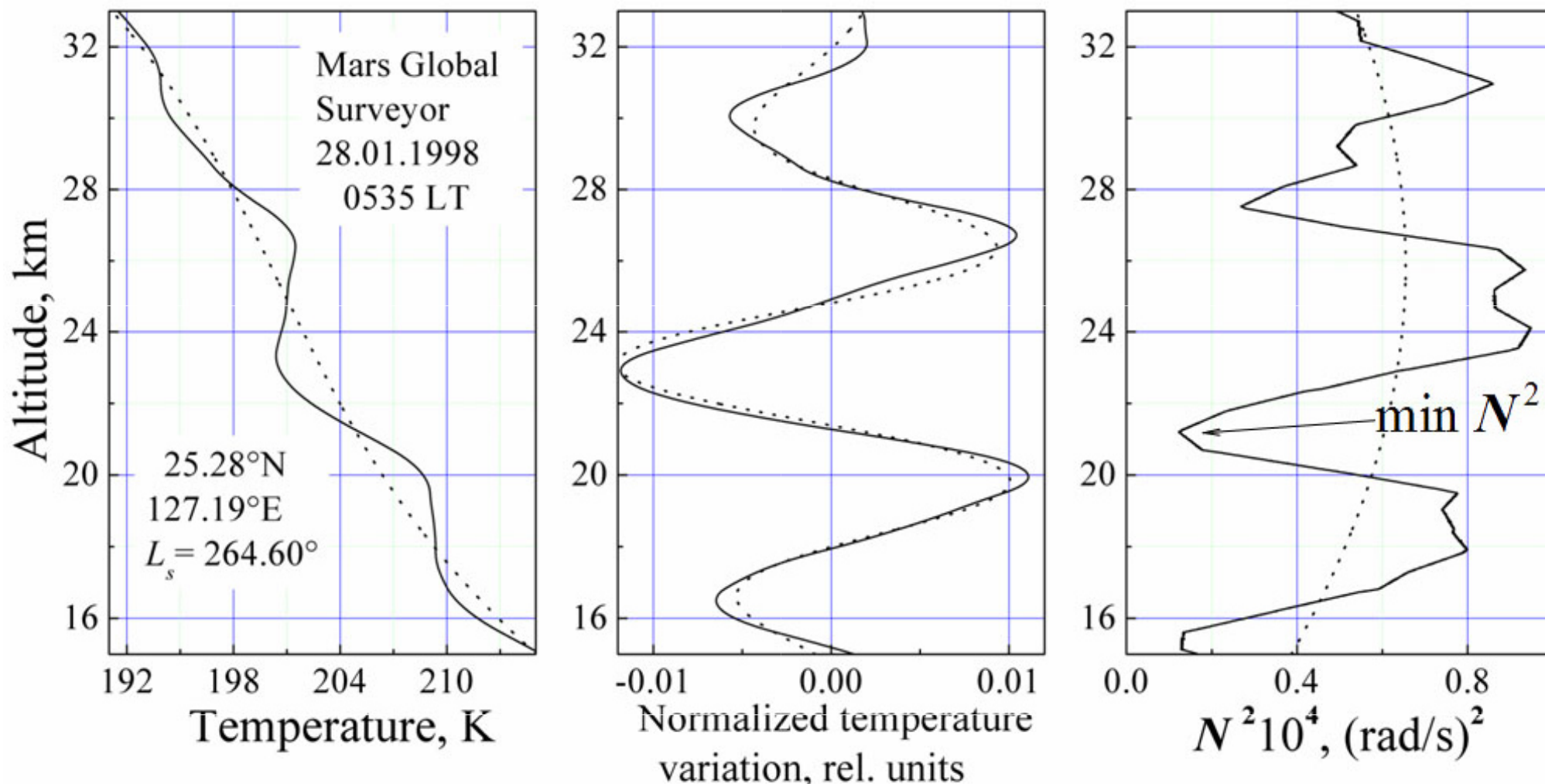
# Экспериментальные данные для анализа волновой активности в атмосфере Марса

Данные о вертикальных профилях температуры миссии *MGS* были взяты нами из архива системы планетарных данных NASA ([http://starbrite.jpl.nasa.gov/pds/...](http://starbrite.jpl.nasa.gov/pds/), Planetary Data System) и они являлись исходным материалом для обработки и анализа с целью идентификации волновых событий и реконструкции характеристик внутренних волн в атмосфере Марса. Вертикальное разрешение этих профилей, которое зависит от геометрии эксперимента и длины волны зондирующего сигнала, ограничивается дифракционными эффектами и составляет  $\sim 1$  км. Вблизи поверхности планеты, где восстанавливаемые профили наиболее точны, стандартное отклонение флуктуаций температуры равно примерно 0.4 К, что соответствует величине относительного разброса данных  $\sim 0.2\%$  [Hinson et al., 2001]. Вертикальное разрешение данных о температуре заметно отличалось для разных профилей, но было не хуже 1250 м [Creasey et al., 2006]. Поэтому, для соблюдения последовательности в обработке данных и для упрощения спектрального анализа исследуемых флуктуаций, проводилась высотная интерполяция значений температуры через каждые 1250 м. Высоочастотная фильтрация флуктуаций температуры с отсечкой на 10 км позволила нам исключить структуры с вертикальной длиной волны более 10 км, которые могут быть обусловлены не ВГВ, а тепловыми приливами, наиболее часто возникающими в атмосфере над горными массивами, в частности над районом Фарсиды [Creasey et al., 2006].

На следующем шаге обработки данных, к вертикальным профилям температуры применялся метод анализа волновых событий и определения характеристик ВГВ, подробно рассмотренный нами в работе [Губенко и др., 2015]. Как следует из работ [Gubenko et al., 2011; Губенко и др., 2012, 2015, 2016а, 2016б], в случае положительной идентификации ВГВ, можно определить ключевые волновые параметры, такие как собственная частота, амплитуды вертикальных и горизонтальных возмущений скорости ветра, вертикальная и горизонтальная длины волн, собственная вертикальная и горизонтальная фазовая (и групповая) скорости, плотности кинетической, потенциальной и полной энергии, вертикальные потоки волновой энергии и горизонтального импульса и др. С целью идентификации волновых событий, нами были отобраны вертикальные профили, в которых наблюдались заметные квазипериодические вариации температуры. В каждом из отобранных профилей определялся интервал волновых наблюдений для дальнейшего анализа профиля [Губенко и др., 2015].



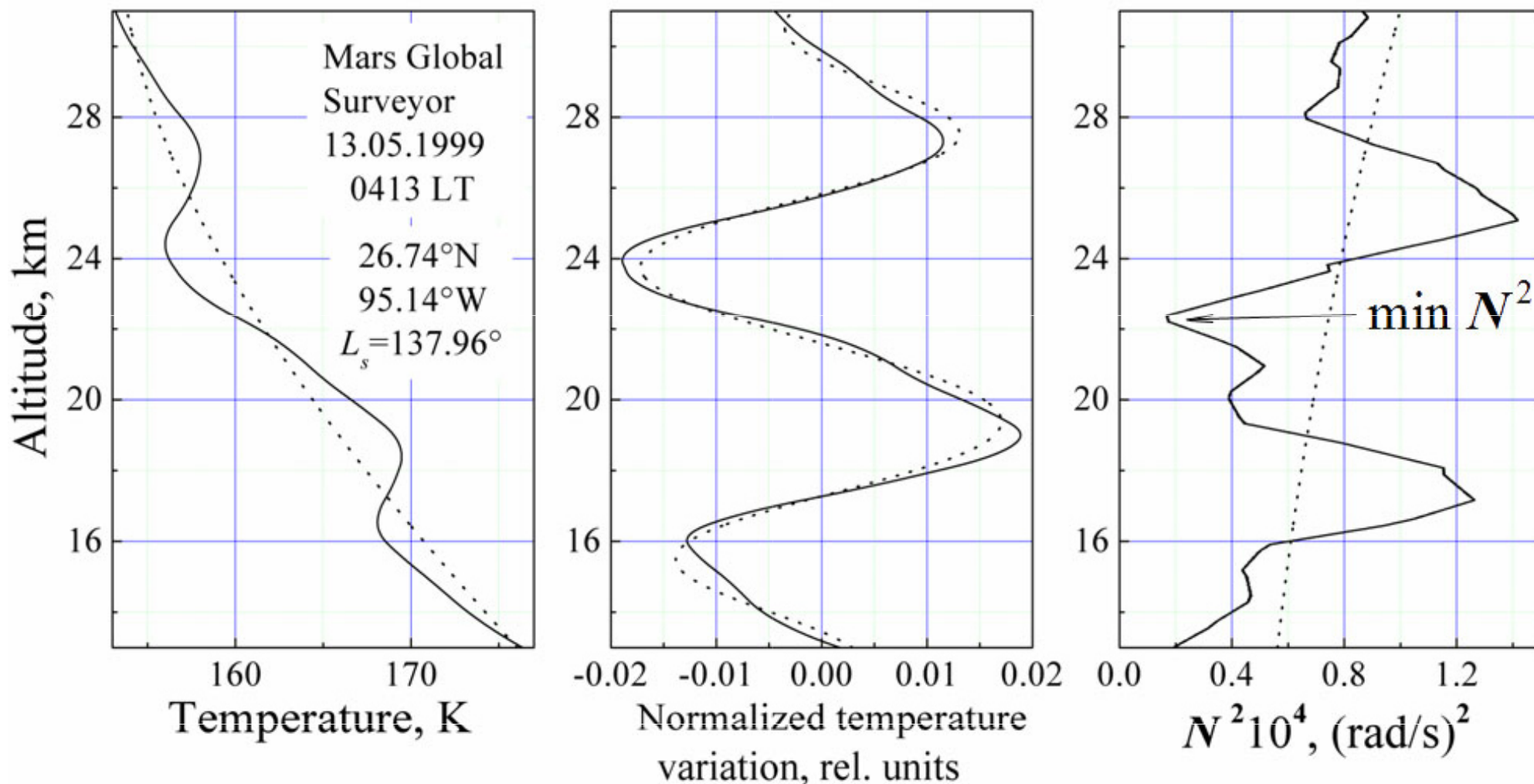
# Исследования внутренних волн в атмосфере Марса



**Рис. 3.** Исследования ВГВ в атмосфере Марса по результатам анализа вертикального профиля температуры (28 января 1998 года), восстановленного из радиозатменных измерений миссии *MGS*. **Сезон** – поздняя осень в Северном полушарии (небесная долгота  $L_s=264.60^\circ$ ); **местное время** – 05 ч 35 мин, что соответствует раннему утру. **Волновые характеристики:**  $\lambda_z=6.8$  км;  $\lambda_h=1770$  км;  $E=68.6$  Дж/кг;  $p=E_k/E_p=9.2$ ;  $E_p=6.7$  Дж/кг;  $f/\omega=0.90$ ;  $T^n=2\pi/\omega=25.8$  ч;  $a_e=0.61$ ;  $|u'|=11.7$  м/с;  $|v'|=10.5$  м/с [Губенко и др., 2015].



## Волновые наблюдения в атмосфере Марса



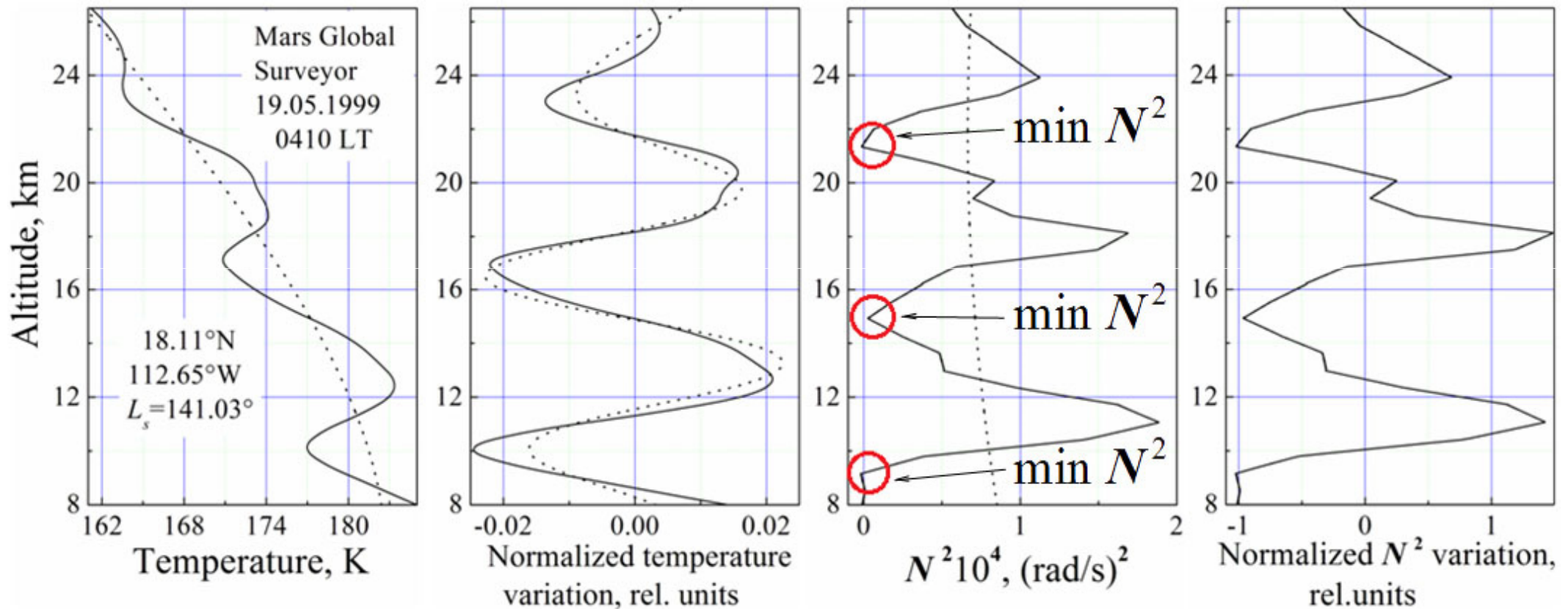
**Рис. 4.** Пример волновых наблюдений в атмосфере Марса на основе анализа вертикального профиля температуры (13 мая 1999 года), восстановленного из радиозатменных измерений миссии *MGS*. **Сезон** – лето в Северном полушарии (небесная долгота  $L_s = 137.96^\circ$ ); **местное время** – 04 ч 13 мин, что соответствует раннему утру. **Волновые характеристики:**  $\lambda_z = 8.2$  км;  $\lambda_h = 2520$  км;  $E = 129$  Дж/кг;  $p = E_k/E_p = 11.4$ ;  $E_p = 10.4$  Дж/кг;  $f/\omega = 0.92$ ;  $T^n = 2\pi/\omega = 25.0$  ч;  $a_e = 0.57$ ;  $|u'| = 16.1$  м/с;  $|v'| = 14.7$  м/с [Губенко и др., 2015].

# Случай полностью насыщенной ВГВ и индуцированная волной турбулентность в атмосфере Марса

На Рис. 5 показан пример высотных зависимостей вариаций температуры и квадрата частоты плавучести в интервале 8–26.5 км, восстановленных из измерений миссии *MGS* 19.05.1999 г. в атмосфере Марса. В отличие от Рис. 3 и 4, на крайней правой панели Рис. 5 дополнительно представлен профиль нормированных вариаций  $N^2$ . Указанные измерения были проведены марсианским летом ( $L_s=141.03^\circ$ ) в 04 ч 10 м местного времени в атмосферном районе с координатами  $18.11^\circ\text{N}$  и  $112.65^\circ\text{W}$ , расположенном над горным вулканическим массивом Фарсиды [*Creasey et al.*, 2006]. Мощные квазипериодические вариации  $T$  и  $N^2$  с вертикальной длиной волны  $\sim 6.6$  км идентифицируются как проявления насыщенной ВГВ в атмосфере планеты.

Две независимые, и хорошо согласующиеся между собой, оценки волновой амплитуды  $a_e = 0.95$  и  $A_{N^2}^{rel} = 1$  свидетельствуют о том, что степень насыщения волновой амплитуды составляет не менее 95%, поскольку для насыщенной ВГВ с любой собственной частотой  $\omega$  относительная пороговая амплитуда  $a$  не превышает единицу [*Губенко и др.*, 2015]. Собственная частота внутренней волны примерно в 2.4 раза больше инерционной частоты ( $f/\omega = 0.42$ ), а ее кинетическая энергия в 1.4 раза превосходит потенциальную энергию (Таблица 1). Из рис. 5 следует, что распространение ВГВ приводит к сильной модуляции стабильности атмосферной стратификации. Локальные значения параметра  $N^2$  достигают нулевой отметки вблизи уровней 9, 15 и 21 км, что предполагает здесь не только динамическую, но и конвективную неустойчивость, и возникновение тонких слоев перемежающейся турбулентности в атмосфере. Красные кружки на Рис. 5 указывают положения тонких турбулентных слоев, индуцированных распространением насыщенной внутренней волны в атмосфере Марса. Считается, что тонкие слои турбулентности, имеющие толщину существенно меньше  $\lambda_z$  и горизонтальную протяженность порядка  $\lambda_h$ , не могут разрушить структуру волнового поля [*Губенко и др.*, 2015].

# Случай полностью насыщенной ВГВ в атмосфере Марса



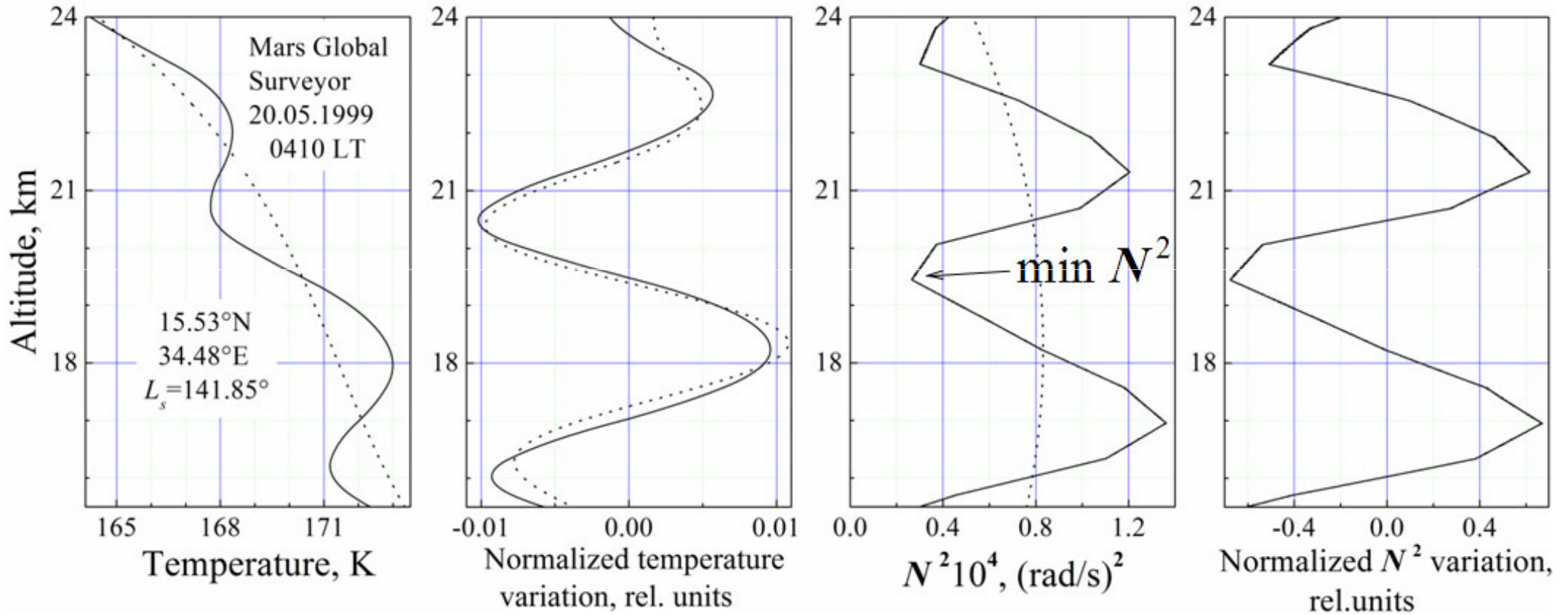
**Рис. 5.** Проявление полностью насыщенной ВГВ (степень насыщения  $\geq 0.95$ ) в атмосфере Марса (вулканический массив Фарсиды) по результатам анализа вертикального профиля температуры (19 мая 1999 года), восстановленного из радиозатменных измерений миссии *MGS*. Сезон – лето в Северном полушарии (небесная долгота  $L_s = 141.03^\circ$ ); местное время – 04 ч 10 мин, что соответствует раннему утру. **Волновые характеристики:**  $\lambda_z = 6.6$  км;  $\lambda_h = 580$  км;  $E = 42.7$  Дж/кг;  $p = E_k/E_p = 1.4$ ;  $E_p = 17.6$  Дж/кг;  $f/\omega = 0.42$ ;  $T^{ln} = 2\pi/\omega = 16.6$  ч;  $a_e = 0.95$ ;  $|u'| = 9.2$  м/с;  $|v'| = 3.9$  м/с [Губенко и др., 2015].

# Пример “чистых” волновых наблюдений в атмосфере Марса

На рис. 6 представлен редкий пример, так называемых, “чистых” волновых наблюдений, когда в спектре анализируемых флуктуаций температуры не было обнаружено помех. Квазипериодические вариации температуры  $T$  и квадрата частоты плавучести  $N^2$  с вертикальной длиной волны  $\sim 4.5$  км были идентифицированы как следы распространения инерционной ВГВ в атмосфере Марса. Собственная частота внутренней волны близка к инерционной частоте ( $f/\omega = 0.89$ ), а ее кинетическая энергия в 8.4 раза превышает потенциальную энергию.

Следует отметить очень хорошее соответствие величин волновых параметров, реконструируемых двумя разными способами [Губенко и др., 2015]. Величина  $A_{N^2}^{rel} = 0.63$ , найденная на основе анализа вариаций квадрата частоты плавучести, совпадает с оценкой волновой амплитуды  $a_e$ , полученной с помощью данных о температуре (Таблица 1). Аналогичным образом определялись значения других характеристик ВГВ:  $f/\omega = 0.89$ ;  $|u'| = 8.9$  м/с;  $|v'| = 7.8$  м/с. Сравнение найденных значений с соответствующими из Таблицы 1 показывает, что результаты реконструкции параметров ВГВ, полученные двумя разными методами, практически полностью совпадают [Губенко и др., 2015].

# Пример “чистых” волновых наблюдений в атмосфере Марса



**Рис. 6.** Проявление “чистых” волновых наблюдений в атмосфере Марса, когда в спектре анализируемых флуктуаций температуры не было обнаружено помех. **Сезон** – лето в Северном полушарии (небесная долгота  $L_s = 141.85^\circ$ ); **местное время** – 04 ч 10 мин, что соответствует раннему утру. **Волновые характеристики:**  $\lambda_z = 4.5$  км;  $\lambda_h = 2080$  км;  $E = 39.9$  Дж/кг;  $p = E_k/E_p = 8.4$ ;  $E_p = 4.2$  Дж/кг;  $f/\omega = 0.89$ ;  $T^n = 2\pi/\omega = 40.7$  ч;  $a_e = 0.63$ ;  $|u'| = 8.9$  м/с;  $|v'| = 7.9$  м/с [Губенко и др., 2015].



**Таблица 1.** Характеристики внутренних волн, найденных по результатам анализа 6 радиозатменных профилей температуры миссий *CHAMP* и *MARS GLOBAL SURVEYOR* в атмосферных районах Земли и Марса. Указаны координаты исследованных районов, время проведения измерений, интервалы волновых наблюдений и погрешности определяемых параметров, если они < 100%

Satellite	CHAMP		Mars Global Surveyor		Mars Global Surveyor	
	ingress	EARTH	ingress	MARS	ingress	MARS
IGW parameters	07 April 2001	15 January 2002	28 January 1998	13 May 1999	19 May 1999	20 May 1999
	06 h 51 m UT	21h 39 m UT	05 h 35 m LT	04 h 13 m LT	04 h 10 m LT	04 h 10 m LT
	84.2° S	66.8° N	25.28° N,	26.74° N,	18.1° N	15.5° N
	83.2° E	112.4° W	127.19° E	95.14° W	112.7° W	34.5° E
	[25.5÷32.0] km	[9.2÷16.7] km	[15.0÷33.0] km	[13.0÷31.0] km	[8.0÷26.5] km	[15.5÷24.0] km
$\lambda_z$ , km	$2.2 \pm 0.7$	$2.1 \pm 0.6$	$6.8 \pm 0.6$	$8.2 \pm 0.7$	$6.6 \pm 0.6$	$4.5 \pm 0.7$
$ \bar{T} , 10^{-3}$ rel. units	$6.5 \pm 1.3$	$5.4 \pm 1.2$	$10.8 \pm 1.2$	$15.0 \pm 1.7$	$19.0 \pm 1.4$	$10.0 \pm 1.7$
$N_b^2, 10^{-4} \text{ rad}^2 \text{ s}^{-2}$	$4.5 \pm 0.8$	$4.5 \pm 0.7$	$0.60 \pm 0.34$	$0.75 \pm 0.41$	$0.7 \pm 0.5$	$0.8 \pm 0.4$
$N_{min}^2, 10^{-4} \text{ rad}^2 \text{ s}^{-2}$	2.5	2.7	0.12	0.18	0	0.3
$a_e$ , rel. units	$0.41 \pm 0.17$	$0.36 \pm 0.27$	$0.61 \pm 0.36$	$0.57 \pm 0.32$	$0.95 \pm 0.64$	$0.63 \pm 0.34$
$A_{N^2}^{rel}$ , rel. units	0.45	0.40	0.80	0.76	1	0.63
$f/\omega$ , rel. units	$0.97 \pm 0.04$	$0.98 \pm 0.13$	$0.90 \pm 0.18$	$0.92 \pm 0.14$	0.4	$0.89 \pm 0.19$
$\omega, 10^{-4} \text{ rad s}^{-1}$	$1.5 \pm 0.1$	$1.4 \pm 0.2$	$0.68 \pm 0.14$	$0.70 \pm 0.11$	1.1	$0.4 \pm 0.1$
$T^{in}$ , hours	$11.6 \pm 0.4$	$13 \pm 2$	$25.8 \pm 5.3$	$25.0 \pm 3.8$	17	$41 \pm 9$
$ u' $ , $\text{m s}^{-1}$	$11.8 \pm 4.1$	$11.4 \pm 2.9$	$11.7 \pm 4.6$	$16.1 \pm 5.9$	$9.2 \pm 6.5$	$8.9 \pm 3.4$
$ v' $ , $\text{m s}^{-1}$	$11.5 \pm 4.1$	$11.1 \pm 3.2$	$10.5 \pm 5.8$	$14.7 \pm 7.0$	3.9	$7.9 \pm 4.3$
$ w' $ , $10^{-3} \text{ m s}^{-1}$	$21 \pm 12$	16	$45.1 \pm 35.7$	$52.2 \pm 37.8$	105	$20 \pm 15$
$ C_{ph}^{in} $ , $\text{m s}^{-1}$	$29 \pm 18$	$32 \pm 9$	$19.1 \pm 17.0$	$28.1 \pm 23.7$	9.7	$14 \pm 12$
$ C_{pz}^{in} $ , $10^{-3} \text{ m s}^{-1}$	$53 \pm 17$	$45 \pm 16$	$73.6 \pm 16.4$	$91.2 \pm 15.8$	110	$31 \pm 8$
$\lambda_h$ , km	$1230 \pm 790$	$1450 \pm 460$	1770	$2520 \pm 2490$	580	2080
$E_p$ , $\text{m}^2 \text{ s}^{-2}$	$2.3 \pm 1.0$	$1.5 \pm 1.3$	$6.7 \pm 4.1$	$10.4 \pm 6.2$	$18 \pm 12$	$4.2 \pm 2.5$
$E$ , $\text{m}^2 \text{ s}^{-2}$	$70 \pm 48$	$65 \pm 22$	$68.6 \pm 53.8$	$129 \pm 95$	43	$40 \pm 30$
$p = E_k/E_p$ , rel. units	$30 \pm 25$	$41 \pm 10$	9.2	11.4	1.4	8.4



# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Разработан новый метод идентификации дискретных волновых событий и определения характеристик внутренних волн на основе анализа вертикального профиля температуры, плотности или квадрата частоты Брента-Вяйсяля в атмосфере планеты [*Gubenko et al.*, 2008, 2011; *Губенко и др.*, 2012, 2015, 2016а, 2016б]. Сформулирован и обоснован дискриминационный критерий идентификации волновых событий, в случае выполнения которого анализируемые флуктуации могут рассматриваться как волновые проявления в атмосфере планеты.
- 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.*, 2012, 2015, 2016а, 2016б].
- В атмосфере Марса, над вулканическим массивом Фарсиды, впервые идентифицирована практически полностью насыщенная внутренняя волна (степень насыщения  $\geq 0.95$ ). Обнаруженные в атмосфере Марса ВГВ с вертикальной длиной волны 4.5–8.2 км являются волнами с низкими собственными частотами, близкими к инерционной частоте, а их кинетическая энергия, как правило, на порядок превышает потенциальную энергию. Распространение этих волн вызывает значительную модуляцию вертикальной стабильности атмосферной стратификации, что приводит к сдвиговой неустойчивости и возникновению тонких регулярных слоев перемежающейся турбулентности в атмосфере Марса.
- Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Программы №28 Президиума РАН.

# 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. 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. Vol. 33. No. L01803. DOI: 10.1029/2005GL024037.
6. 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.
7. 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.
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 // Journal of Geophysical Research. 2008. Vol. 113. No. D08109, doi: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 // Atmospheric Measurement Techniques. 2011. Vol. 4. No. 10. P. 2153–2162, doi: 10.5194/amt-4-2153-2011,
10. 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.
11. 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. Vol. 106. No. E1. P. 1463–1480.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.

**Спасибо за внимание!**