

Определение характеристик внутренних
гравитационных волн в атмосферах
планет земной группы по данным анализа
радиозатменных измерений
(РФФИ № 19-02-00083 А)

Губенко В.Н., Кириллович И.А.

*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Фрязинский филиал (ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН), пл. акад. Б.А.
Введенского, дом 1, 141190 Фрязино, Московская обл., Россия*

e-mail: vngubenko@gmail.com

**Девятнадцатая Всероссийская Открытая конференция «СОВРЕМЕННЫЕ
ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА
(Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей
среды, потенциально опасных явлений и объектов)»**

15 - 19 ноября 2021 года, ИКИ РАН, Москва

Введение

Внутренние гравитационные волны (ВГВ) оказывают значительное влияние на циркуляцию, химический состав и тепловой режим атмосфер планет. Важная роль внутренних волн связана с обеспечением ими эффективного механизма переноса энергии и импульса с нижних уровней атмосферы на верхние уровни. В отсутствие диссипации энергии ВГВ в атмосфере Земли, амплитуда волновых возмущений температуры и скорости ветра растет примерно экспоненциально с увеличением высоты, поэтому возмущения с малой амплитудой вблизи поверхности могут производить значительные эффекты на больших высотах, где происходит обрушение волн и передача их энергии и импульса в невозмущенный поток. Поскольку внутренние волны являются характерной особенностью устойчиво стратифицированной атмосферы, то аналогичные эффекты можно наблюдать в атмосферах Венеры и Марса.

Преимуществом радиозатменных измерений является широкий географический и временной охват исследуемых районов, позволяющий проводить глобальный мониторинг состояния атмосферы Земли и планет. Однако, до недавнего времени считалось, что с помощью радиозатменных измерений невозможно оценить ключевые характеристики ВГВ, которые необходимы для количественного описания волновых эффектов, поскольку исследователи полагали, что для этого недостаточно восстанавливаемых радиозатменных профилей температуры и плотности в атмосфере. Нами разработан метод, который может быть использован для идентификации волновых событий и определения параметров ВГВ в атмосфере планеты на основе анализа индивидуального вертикального профиля температуры, плотности или квадрата частоты Брента-Вяйсяля [*Gubenko et al., 2008, 2011*].

Цель работы: представление результатов идентификации волновых событий и восстановления характеристик внутренних волн в атмосферах Земли и Марса на основе анализа радиозатменных профилей температуры CHAMP (Земля) и MARS GLOBAL SURVEYOR (Марс).

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)

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

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

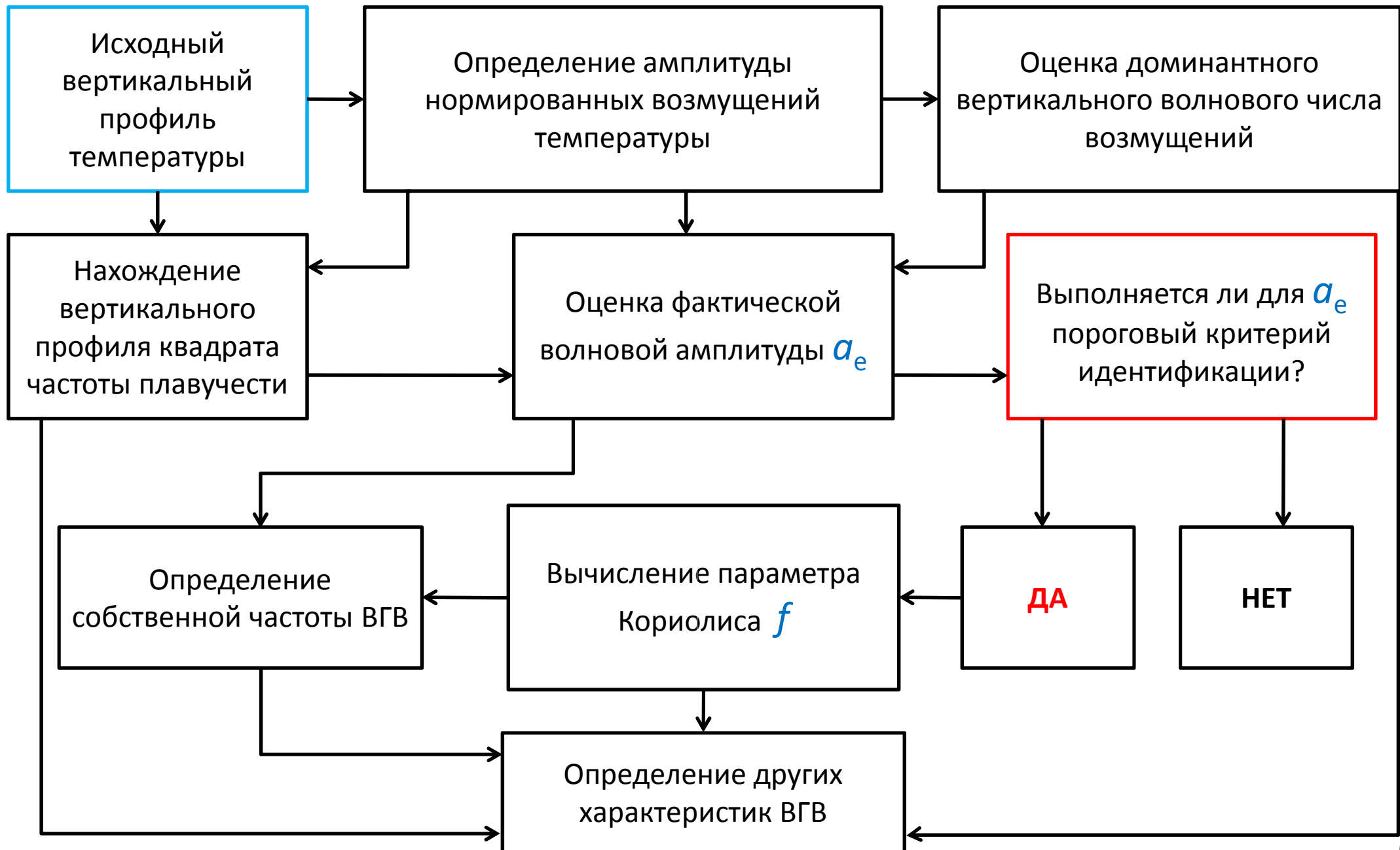
[Gubenko et al., 2008, 2011; Губенко и др., 2012, 2015]

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

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

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

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

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

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

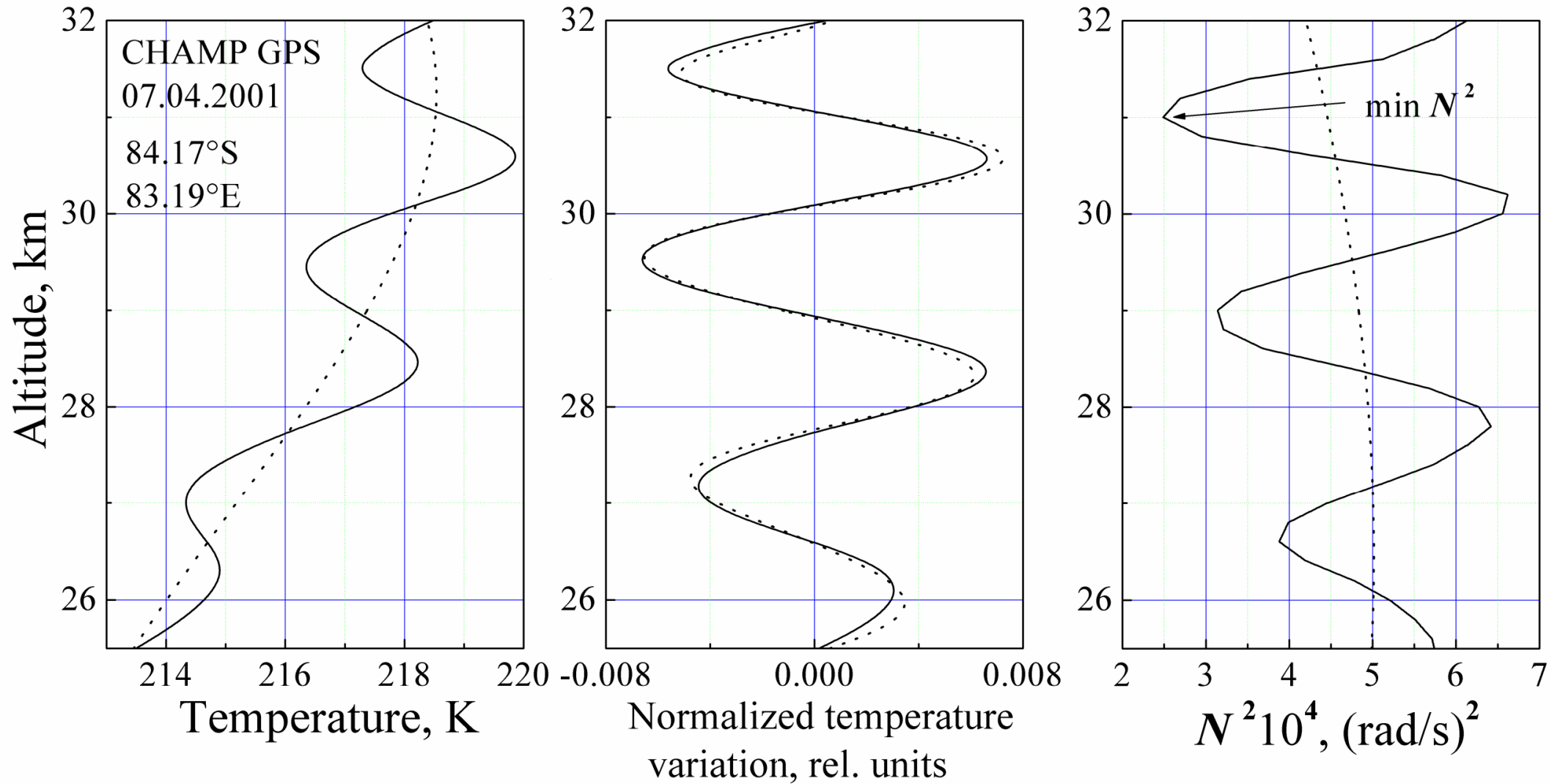


Рис. 1. Волновые возмущения, обнаруженные в атмосфере высоких широт Южного полушария Земли на основе анализа вертикального профиля температуры (07 апреля 2001 года) радиозатменной миссии *CHAMP*. На панелях последовательно представлены вертикальные профили: температуры (слева), нормированных вариаций 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

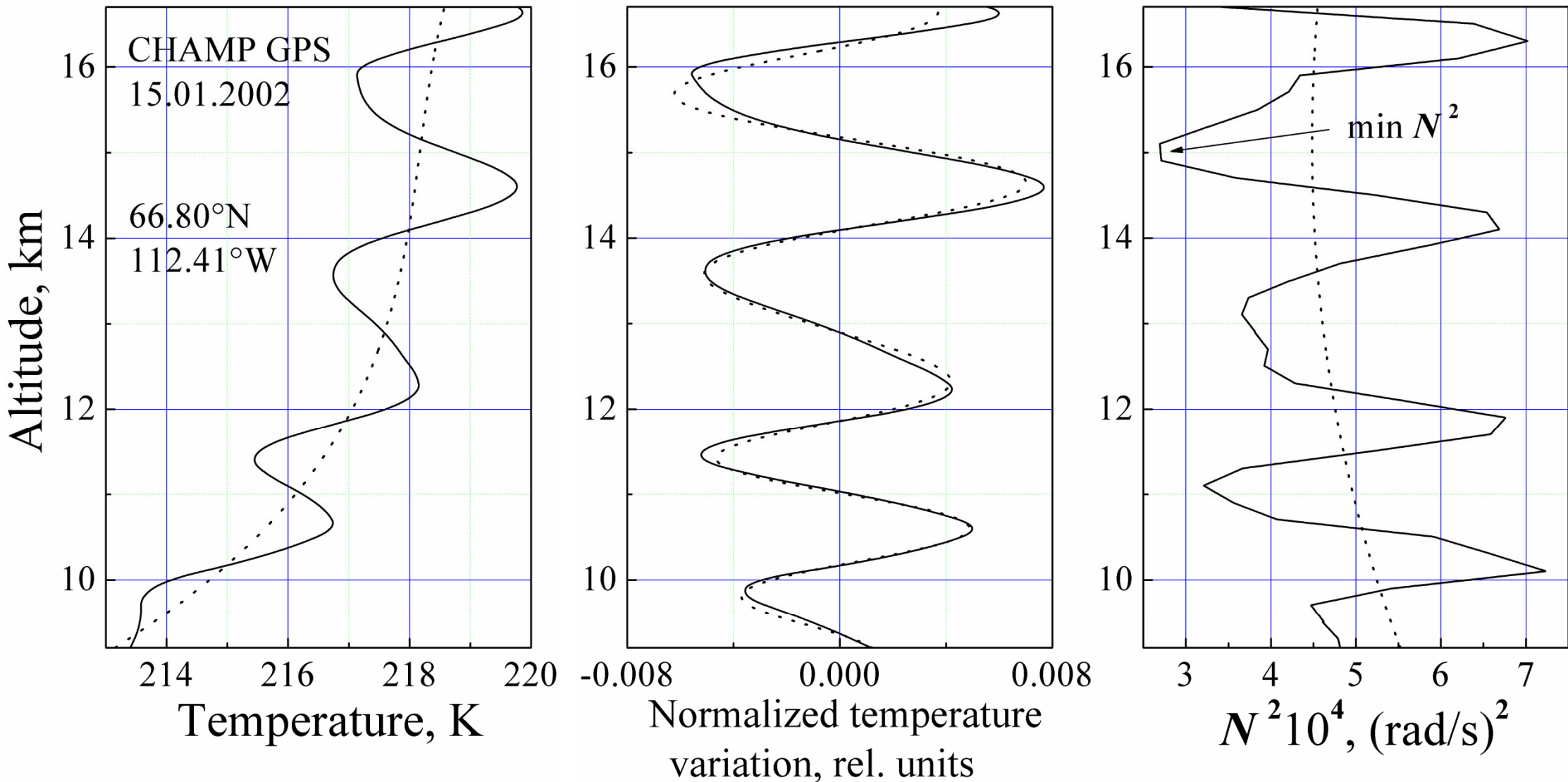


Рис. 2. Волновые возмущения, найденные в атмосфере высоких широт Северного полушария Земли по результатам анализа вертикального профиля температуры (15 января 2002 года) радиозатменной миссии *CHAMP*. Здесь обозначения такие же, как и на Рис. 1.

Исследования внутренних волн в атмосфере Марса

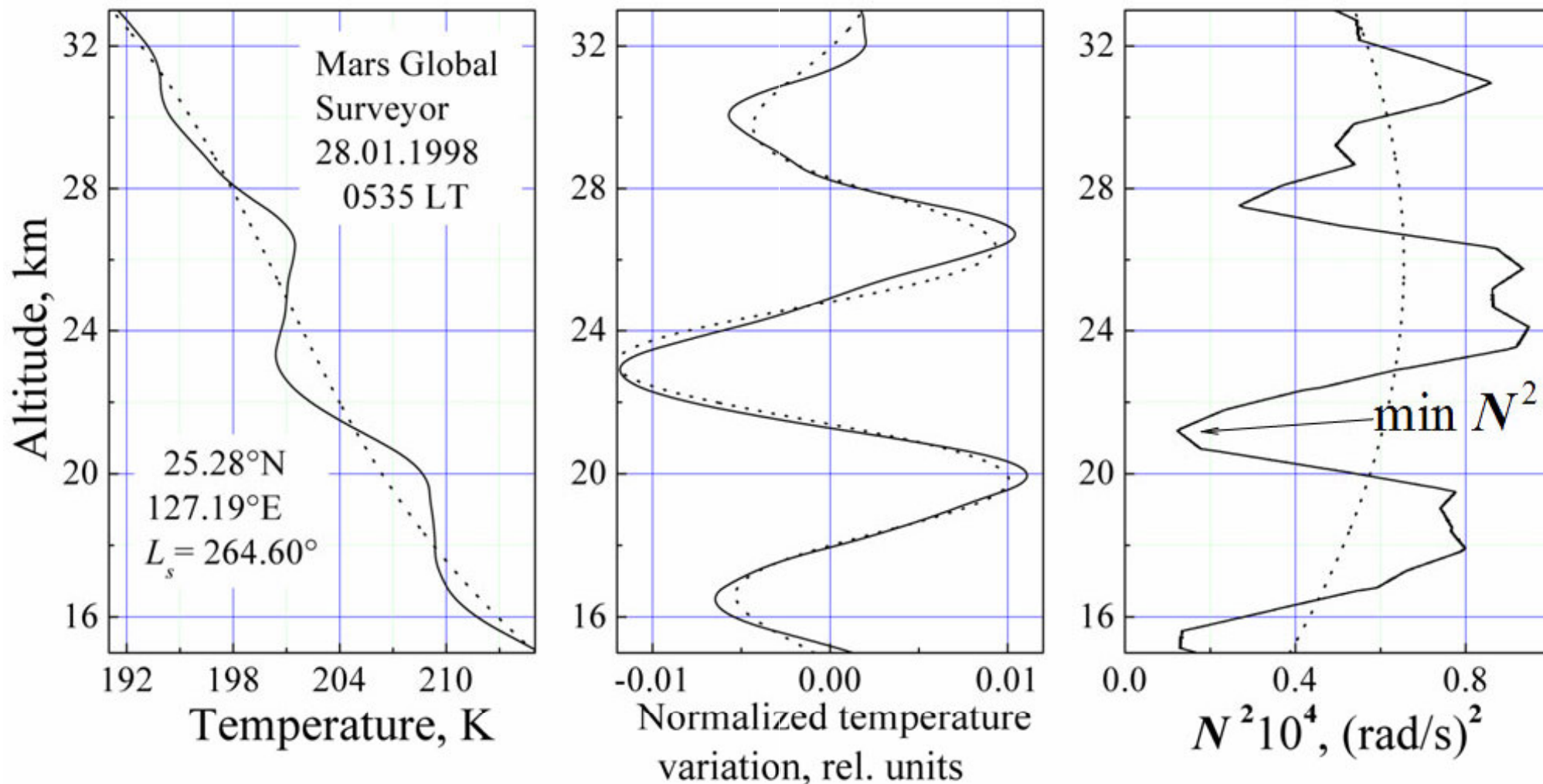


Рис. 3. Исследования ВГВ в атмосфере Марса по результатам анализа вертикального профиля температуры (28 января 1998 года), восстановленного из радиозатменных измерений миссии *MGS*. **Сезон** – поздняя осень в Северном полушарии (небесная долгота $L_s=264.60^\circ$); **местное время** – 05 ч 35 мин, 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

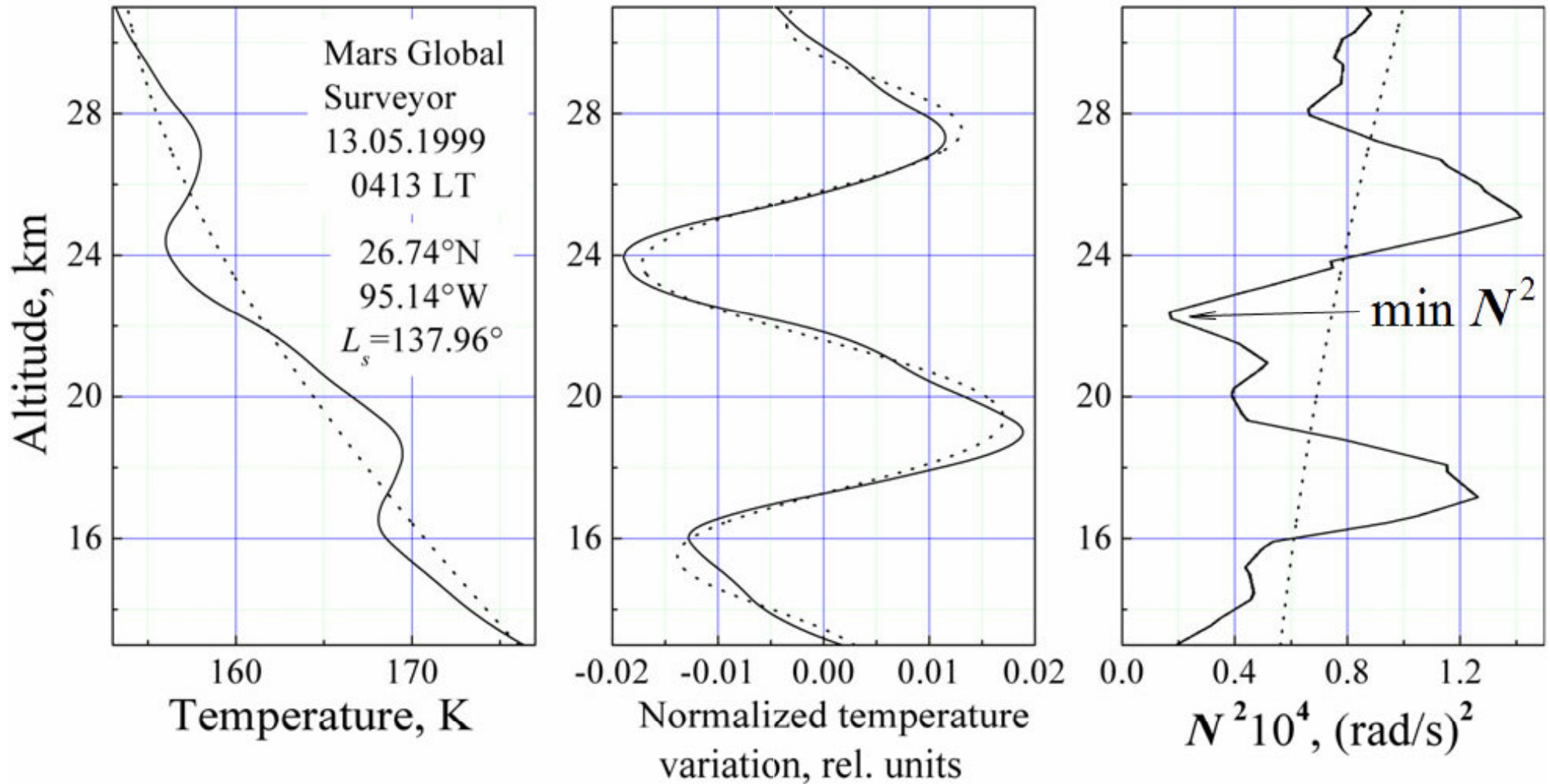


Рис. 4. Пример волновых наблюдений в атмосфере Марса на основе анализа вертикального профиля температуры (13 мая 1999 года), восстановленного из радиозатменных измерений миссии *MGS*. **Сезон** – лето в Северном полушарии (небесная долгота $L_s=137.96^\circ$); **местное время** – 04 ч 13 мин, что соответствует 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 в атмосфере Марса

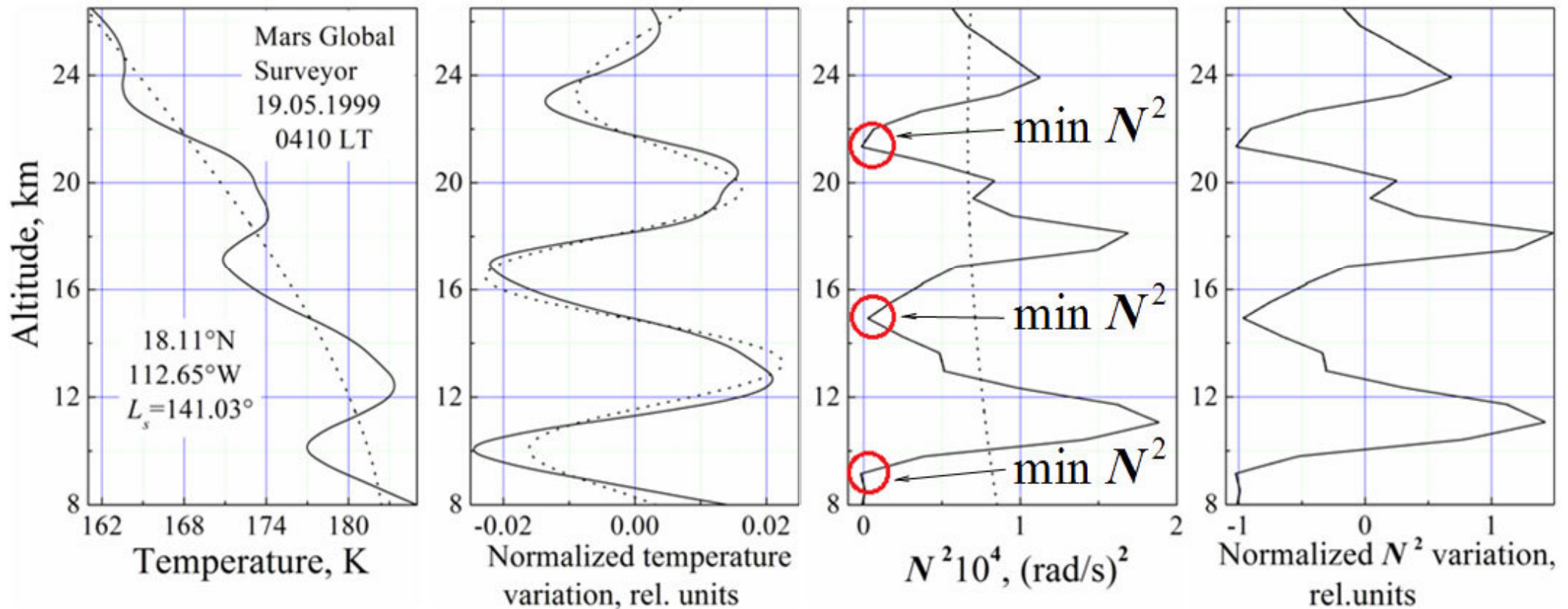


Рис. 5. Проявление полностью насыщенной ВГВ (степень насыщения ≥ 0.95) в атмосфере Марса (вулканический массив Фарсиды) по результатам анализа вертикального профиля температуры (19 мая 1999 года), восстановленного из радиозатменных измерений миссии *MGS*. Сезон – лето в Северном полушарии (небесная долгота $L_s = 141.03^\circ$); 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

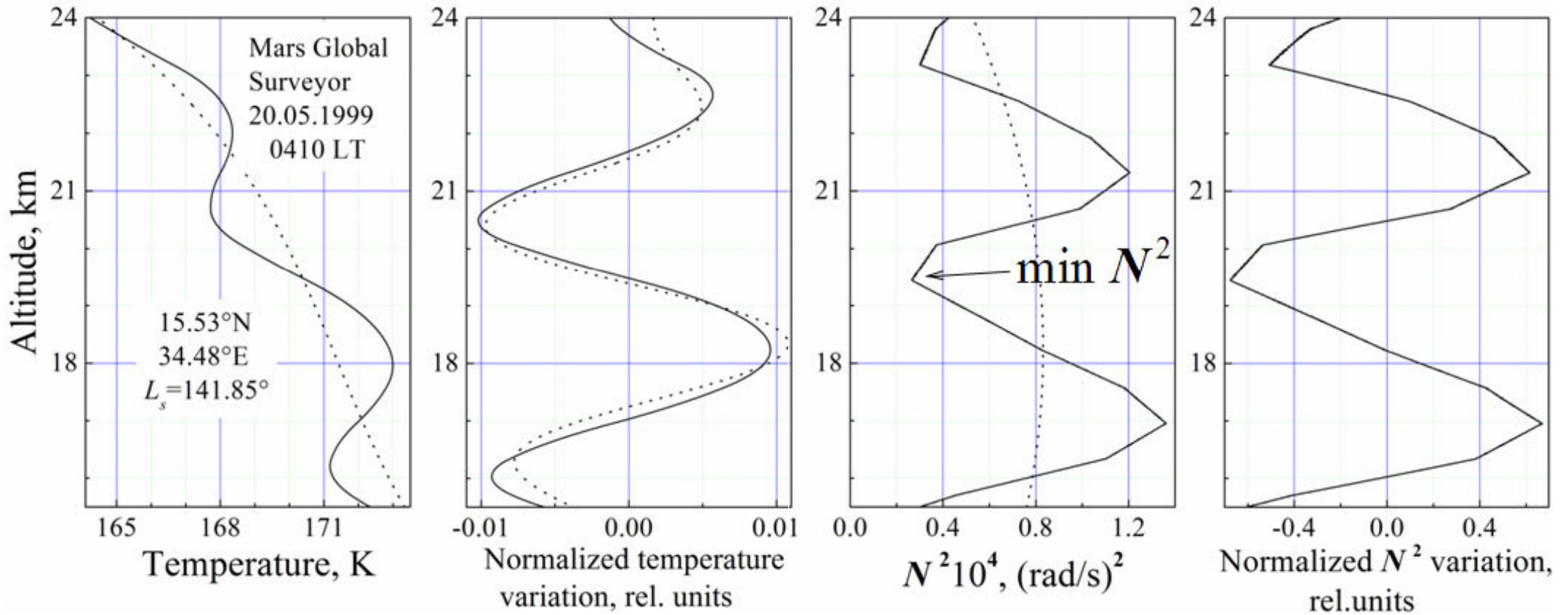


Рис. 6. Проявление “чистых” волновых наблюдений в атмосфере Марса, когда в спектре анализируемых флуктуаций температуры не было обнаружено помех. **Сезон** – лето в Северном полушарии (небесная долгота $L_s = 141.85^\circ$); **местное время** – 04 ч 10 мин, что соответствует раннему утру. **Волновые 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
λ_z , km	2.2 ± 0.7	2.1 ± 0.6	6.8 ± 0.6	8.2 ± 0.7	6.6 ± 0.6	4.5 ± 0.7
$ \bar{T} , 10^{-3}$ rel. units	6.5 ± 1.3	5.4 ± 1.2	10.8 ± 1.2	15.0 ± 1.7	19.0 ± 1.4	10.0 ± 1.7
$N_b^2, 10^{-4} \text{ rad}^2 \text{ s}^{-2}$	4.5 ± 0.8	4.5 ± 0.7	0.60 ± 0.34	0.75 ± 0.41	0.7 ± 0.5	0.8 ± 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 ± 0.17	0.36 ± 0.27	0.61 ± 0.36	0.57 ± 0.32	0.95 ± 0.64	0.63 ± 0.34
$A_{N^2}^{rel}$, rel. units	0.45	0.40	0.80	0.76	1	0.63
f/ω , rel. units	0.97 ± 0.04	0.98 ± 0.13	0.90 ± 0.18	0.92 ± 0.14	0.4	0.89 ± 0.19
$\omega, 10^{-4} \text{ rad s}^{-1}$	1.5 ± 0.1	1.4 ± 0.2	0.68 ± 0.14	0.70 ± 0.11	1.1	0.4 ± 0.1
T^{in} , hours	11.6 ± 0.4	13 ± 2	25.8 ± 5.3	25.0 ± 3.8	17	41 ± 9
$ u' $, m s^{-1}	11.8 ± 4.1	11.4 ± 2.9	11.7 ± 4.6	16.1 ± 5.9	9.2 ± 6.5	8.9 ± 3.4
$ v' $, m s^{-1}	11.5 ± 4.1	11.1 ± 3.2	10.5 ± 5.8	14.7 ± 7.0	3.9	7.9 ± 4.3
$ w' $, 10^{-3} m s^{-1}	21 ± 12	16	45.1 ± 35.7	52.2 ± 37.8	105	20 ± 15
$ C_{ph}^{in} $, m s^{-1}	29 ± 18	32 ± 9	19.1 ± 17.0	28.1 ± 23.7	9.7	14 ± 12
$ C_{pz}^{in} $, 10^{-3} m s^{-1}	53 ± 17	45 ± 16	73.6 ± 16.4	91.2 ± 15.8	110	31 ± 8
λ_h , km	1230 ± 790	1450 ± 460	1770	2520 ± 2490	580	2080
E_p , $\text{m}^2 \text{ s}^{-2}$	2.3 ± 1.0	1.5 ± 1.3	6.7 ± 4.1	10.4 ± 6.2	18 ± 12	4.2 ± 2.5
E , $\text{m}^2 \text{ s}^{-2}$	70 ± 48	65 ± 22	68.6 ± 53.8	129 ± 95	43	40 ± 30
$p = E_k/E_p$, rel. units	30 ± 25	41 ± 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, 2016b]. 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, 2016b].
- В атмосфере Марса, над вулканическим массивом Фарсиды, впервые идентифицирована практически полностью насыщенная внутренняя волна (степень насыщения ≥ 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 в рамках государственного задания и частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект РФФИ № 19-02-00083 А).

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!