

Идентификация волновых процессов и определение характеристик ВГВ в атмосфере Марса по радиозатменным данным MARS GLOBAL SURVEYOR

***В.Н.Губенко, И.А.Кириллович, А.Г.Павельев, В.Е.Андреев,
А.А.Павельев, Р.Р.Салимзянов***

e-mail: vngubenko@gmail.com

*Фрязинский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН (ФИРЭ им.
В.А.Котельникова РАН)*

141190 Московская область, г.Фрязино, пл. акад. Б.А.Введенского, д.1

**Десятая всероссийская открытая ежегодная конференция
«Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»
(Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей
среды, природных и антропогенных объектов)
Москва, ИКИ РАН, 12-16 ноября 2012 г.**

АННОТАЦИЯ Разработана оригинальная методика определения параметров внутренней гравитационной волны (ВГВ) по измерению индивидуального вертикального профиля температуры в атмосферах планет земной группы. Эта методика может быть использована при анализе высотных профилей, измеренных любыми способами. Сформулирован и обоснован критерий идентификации ВГВ, в случае выполнения которого наблюдаемые флуктуации температуры могут рассматриваться как волновые проявления. Методика базируется на анализе относительных амплитудных порогов волнового поля температуры, а также на положении линейной теории насыщенных ВГВ, согласно которому волновые амплитуды ограничиваются процессами динамической (сдвиговой) неустойчивости атмосферы. Предполагается, что когда амплитуда внутренней волны достигает предела сдвиговой неустойчивости по мере распространения волны вверх, диссипация волновой энергии происходит таким образом, что амплитуда ВГВ поддерживается на уровне порога атмосферной неустойчивости.

Применение методики к вертикальным профилям температуры, восстановленным на основе радиозатменных измерений, дало возможность идентифицировать ВГВ в атмосфере Марса и определить величины ключевых волновых параметров, таких как собственная частота, амплитуда вертикальных и горизонтальных возмущений скорости ветра, вертикальная и горизонтальная длина волны, собственная вертикальная и горизонтальная фазовая (и групповая) скорости, кинетическая и потенциальная энергия волн, вертикальные потоки волновой энергии и горизонтального импульса. Представлены и обсуждаются результаты исследования ВГВ, полученные из анализа радиозатменных профилей температуры, которые были восстановлены в атмосфере Марса с помощью аппарата Mars Global Surveyor.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Программы Президиума РАН №22 «Фундаментальные процессы исследований и освоения Солнечной системы» и гранта РФФИ № 10-02-01015-а.

Целью работы является:

- формулировка и обоснование критерия идентификации ВГВ, в случае выполнения которого исследуемые флуктуации температуры могут рассматриваться как волновые проявления;
- разработка методики определения собственной частоты ВГВ и других волновых параметров на основе анализа измерений индивидуального вертикального профиля температуры в атмосфере планеты;
- демонстрация примеров практического применения методики к радиозатменным данным миссии MGS с целью анализа волновой активности и реконструкции параметров ВГВ в атмосфере Марса.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ

[Gubenko et al., (JGR) 2008; Губенко и др., (КИ) 2012]

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

Приближение для ВГВ с промежуточными и низкими собственными частотами

$$|C_{ph}^{in}|^2 = |c_h - \bar{u}|^2 = \frac{\omega^2}{k^2 + l^2} = \frac{N^2}{m^2} \cdot \frac{1}{1 - f^2/\omega^2} \quad \text{Дисперсионное соотношение для ВГВ}$$

Поляризационные уравнения для ВГВ

Относительный амплитудный порог (теория)

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

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

Критерий идентификации ВГВ

(эксперимент)

(теория)

$$1 > a = a_e > 0$$

$$a_e = \frac{g|m|}{N^2} \cdot \frac{|T'|}{T} = \frac{g|m|}{N^2} \cdot \frac{|\rho'|}{\rho} = \frac{2(1 - f^2/\omega^2)^{1/2}}{1 + (1 - f^2/\omega^2)^{1/2}}$$

Квадрат частоты Брента-Вяйсяля

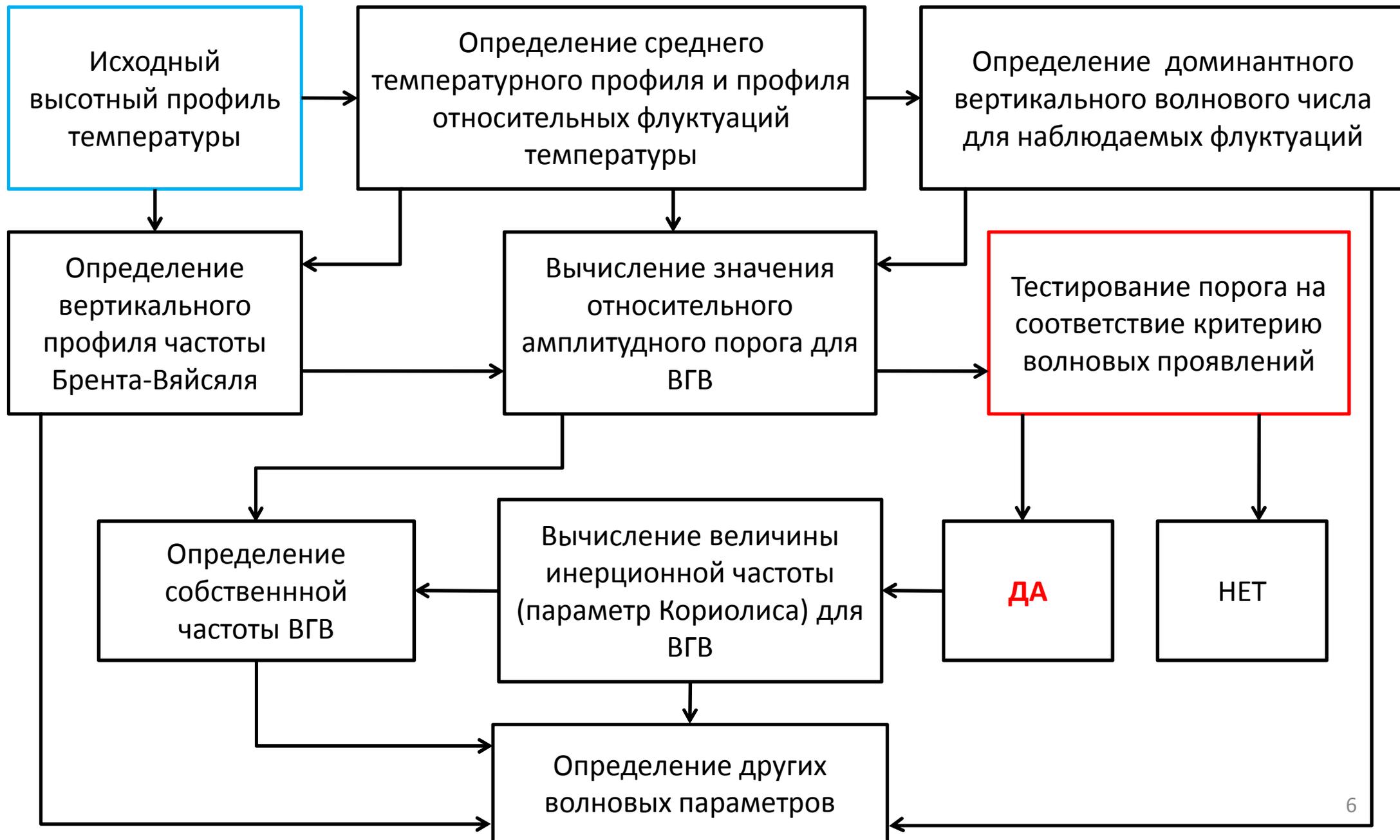
$$N^2 = \frac{g}{T} \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial z} + \frac{g}{c_p} \right)$$

Параметр Кориолиса $f = 2\Omega \cdot \sin\theta$

Квадрат горизонтального волнового числа

$$k_h^2 = k^2 + l^2$$

Блок-схема методики идентификации волновых проявлений и определения параметров ВГВ по результатам анализа высотного профиля температуры в атмосферах планет



ОПРЕДЕЛЯЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВГВ [Gubenko et al., (JGR) 2008]

$$\omega = \frac{f}{2} \cdot \frac{2 - a_e}{(1 - a_e)^{1/2}} \quad \text{Собственная частота ВГВ} \quad \text{Горизонтальное волновое число}$$

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

Собственная горизонтальная фазовая скорость

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

Горизонтальная длина волны

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

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

$$|w'| = \frac{|k_h|}{|m|} \cdot |u'| = \frac{f \cdot a_e}{2|m|} \cdot \frac{2 - a_e}{(1 - a_e)^{1/2}} = \frac{\lambda_z f \cdot a_e}{4\pi} \cdot \frac{2 - a_e}{(1 - a_e)^{1/2}} \quad \text{Амплитуда вертикальных возмущений скорости ветра}$$

Амплитуды горизонтальных возмущений скорости ветра

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

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

в направлении горизонтальной составляющей волнового вектора

в направлении перпендикулярном горизонтальной составляющей волнового вектора

$$\operatorname{tg} \varphi' = \frac{|m|}{|k_h|} = \frac{\lambda_h}{\lambda_z} \quad \begin{array}{l} \text{Тангенс угла между волновым вектором} \\ \text{и горизонтальной плоскостью} \end{array}$$

Кинетическая энергия ВГВ 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 ВГВ на единицу массы

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

$$E = E_k + E_p = \frac{1}{2} |w'|^2 (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi') = \frac{1}{2} (|w'|^2 + |u'|^2) \quad \begin{array}{l} \text{Полная энергия ВГВ} \\ \text{на единицу массы} \end{array}$$

Отношение кинетической к потенциальной энергии

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

$$|C_{gh}^{in}| = \left| \frac{\partial \omega}{\partial k_h} \right| = |C_{ph}^{in}| \cdot \left(1 - \frac{f^2}{\omega^2} \right) = \frac{N}{|m|} \cdot \sqrt{1 - \frac{f^2}{\omega^2}} \quad \begin{array}{l} \text{Собственная горизонтальная} \\ \text{групповая скорость} \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{Собственная вертикальная} \\ \text{групповая скорость} \end{array} \quad |C_{gz}^{in}| = \left| \frac{\partial \omega}{\partial m} \right| = |C_{pz}^{in}| \cdot \left(1 - \frac{f^2}{\omega^2} \right) = \frac{|k_h| N}{m^2} \cdot \sqrt{1 - \frac{f^2}{\omega^2}}$$

ПОТОКИ ВОЛНОВОЙ ЭНЕРГИИ И ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ИМПУЛЬСА, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ВГВ [Gubenko et al., (АМТ) 2011]

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

Отношение вертикальной к горизонтальной групповой скорости

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

Вертикальный поток волновой энергии

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

Горизонтальный поток волновой энергии

$$|F_{ph}| = \left| \overline{u' \cdot w'} \right| = \frac{|u'| \cdot |w'|}{2} = 2 \left| \frac{k_h}{m} \right| E_p$$

Полный вертикальный поток горизонтального импульса ВГВ

ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОГО АМПЛИТУДНОГО ПОРОГА

[Gubenko et al., (JGR) 2008; Губенко и др., (КИ) 2012]

$$a_e = \frac{g|m|}{N^2} \cdot \frac{|T'|}{\bar{T}} = \frac{2\pi \cdot g}{\lambda_z N^2} \cdot \frac{|T'|}{\bar{T}} = \frac{2(1 - f^2/\omega^2)^{1/2}}{1 + (1 - f^2/\omega^2)^{1/2}}$$

*Относительный
амплитудный порог*

Относительная погрешность определения амплитудного порога

$$X = \frac{\delta a_e}{a_e} \approx \left[\left(\frac{\delta |T'|}{|T'|} \right)^2 + \left(\frac{\delta \lambda_z}{\lambda_z} \right)^2 + \left(\frac{\delta N^2}{N^2} \right)^2 \right]^{1/2} \approx \left[\frac{\lambda_z}{L} \left(\frac{\delta T}{|T'|} \right)^2 + \frac{\lambda_z}{L} \left(\frac{\delta h}{\lambda_z} \right)^2 + 2\pi^2 \left(\frac{|T'|}{\lambda_z} \right)^2 \cdot \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial z} + \frac{g}{c_p} \right)^{-2} \right]^{1/2}$$

$1 > a = a_e > 0$ *Теоретические ограничения для амплитудного порога*

*Ограничения для амплитудного порога,
определяемого в реальном эксперименте*

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

*Минимальная амплитуда волновых возмущений
температуры, допускающая идентификацию ВГВ*

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

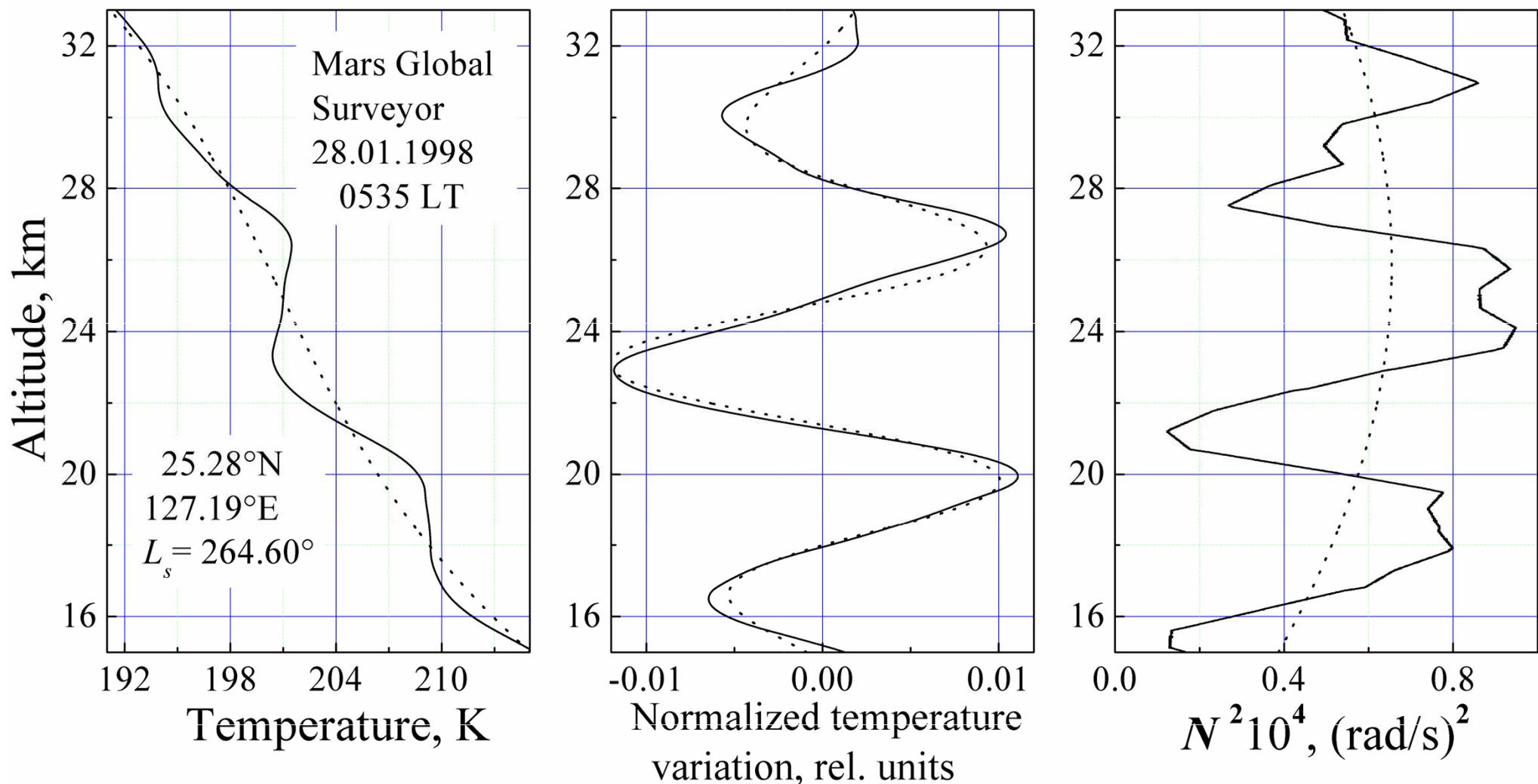


Рис. 1. Пример квазипериодических вариаций температуры в вертикальном профиле $T(h)$, восстановленном по радиозатменным измерениям миссии MGS 28.01.1998 г. в атмосфере Марса (файл данных: 8028X18A .TPS). Сезон – поздняя осень в северном полушарии (небесная долгота $L_s=264.60^\circ$), местное время 05 ч 35 м соответствует раннему утру.

На последовательных панелях **Рис. 1** (слева направо) показаны высотные профили температуры, нормированных вариаций температуры и квадрата частоты Брента-Вяйсяля N^2 , соответственно. Сплошной линией (**левая панель**) представлены исходные данные о температуре, сглаженные методом скользящего среднего по интервалу 1250 м, а пунктиром показан средний профиль невозмущенной температуры, полученный в результате МНК- аппроксимации экспериментальных данных полиномом 3-ей степени на интервале волновых наблюдений. На основе исходного и среднего профилей температуры были определены оригинальный (сплошная линия) и средний (пунктир) профили N^2 (**правая панель**). Используя низкочастотный цифровой фильтр с отсечкой 4.5 км, мы из исходных данных о нормированных вариациях температуры (сплошная линия, **средняя панель**) получали сглаженный профиль (пунктир, **средняя панель**). Показанные на **Рис. 1** мощные квазипериодические вариации T и N^2 имеют доминантную вертикальную длину волны ~ 6.8 км и идентифицируются как проявления низкочастотной внутренней гравитационной волны в атмосфере Марса (см. параметры ВГВ в **Табл. 1**).

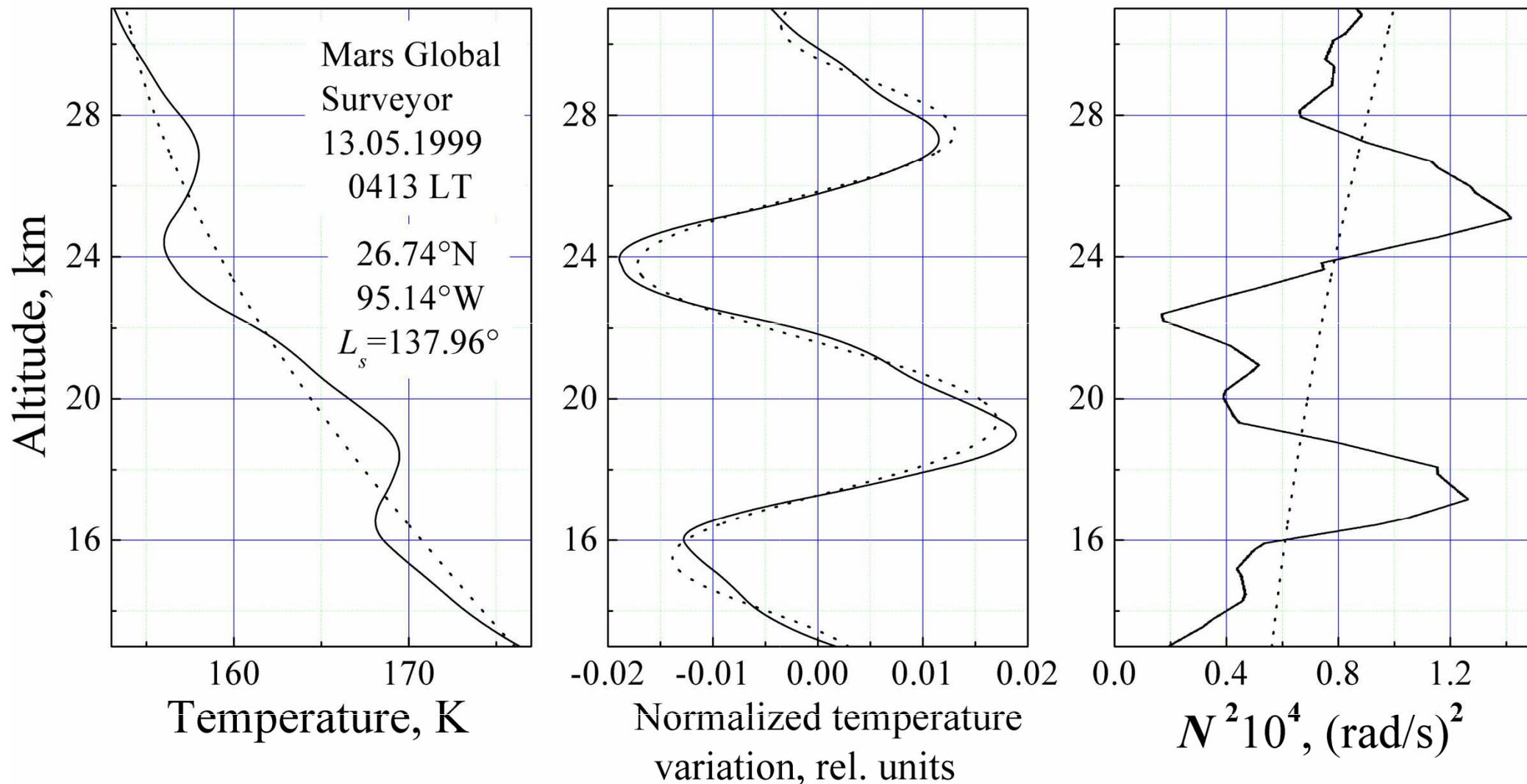


Рис. 2. Пример квазипериодических вариаций температуры в вертикальном профиле $T(h)$, восстановленном по радиозатменным измерениям миссии MGS 13.05.1999 г. в атмосфере Марса (файл данных: 9133B13A .TPS). Сезон – лето в северном полушарии (небесная долгота $L_s = 137.96^\circ$), местное время 04 ч 13 м соответствует раннему утру.

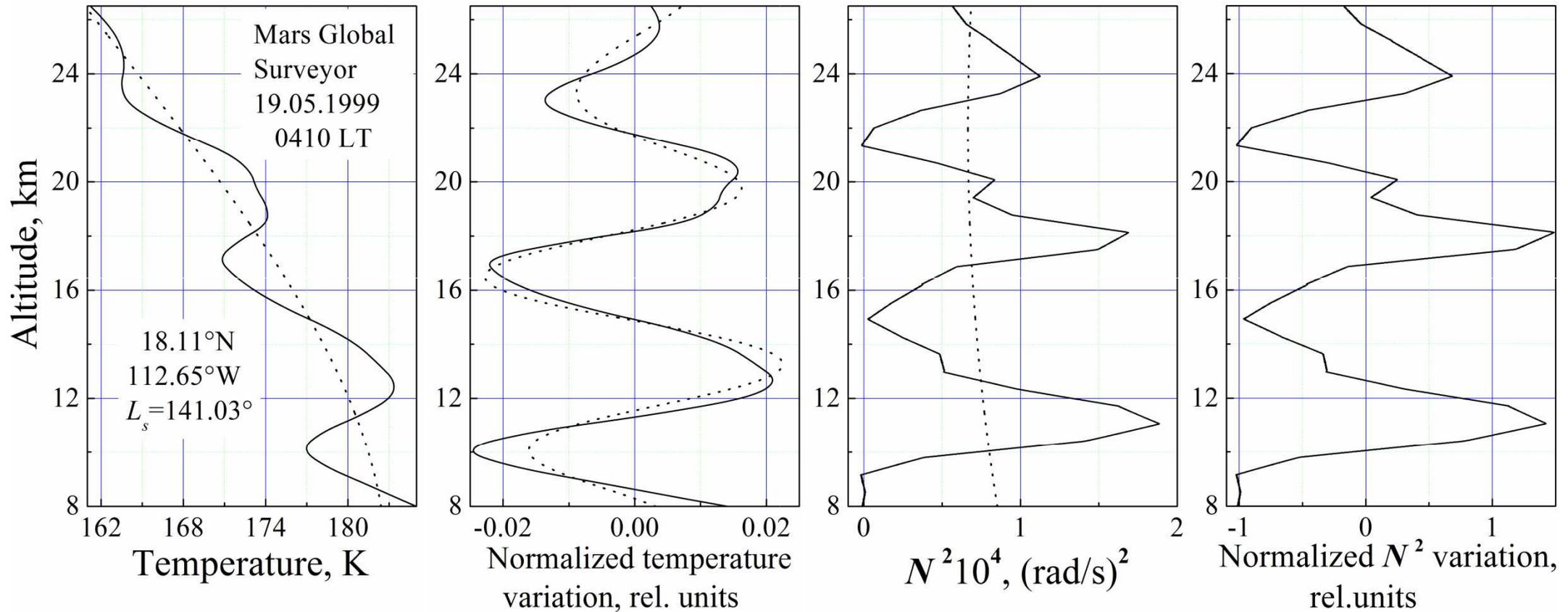


Рис. 3. Пример квазипериодических вариаций температуры в вертикальном профиле $T(h)$ в атмосфере Марса (файл данных: 9139G18A.TPS), восстановленном по радиозатменным измерениям миссии MGS 19.05.1999 г. в районе Tharsis (см. [Creasey et al. \[2006\]](#)). Сезон – лето ($L_s = 141.03^\circ$), местное время 04 ч 10 м. Профиль нормированных вариаций N^2 добавлен на правой панели.

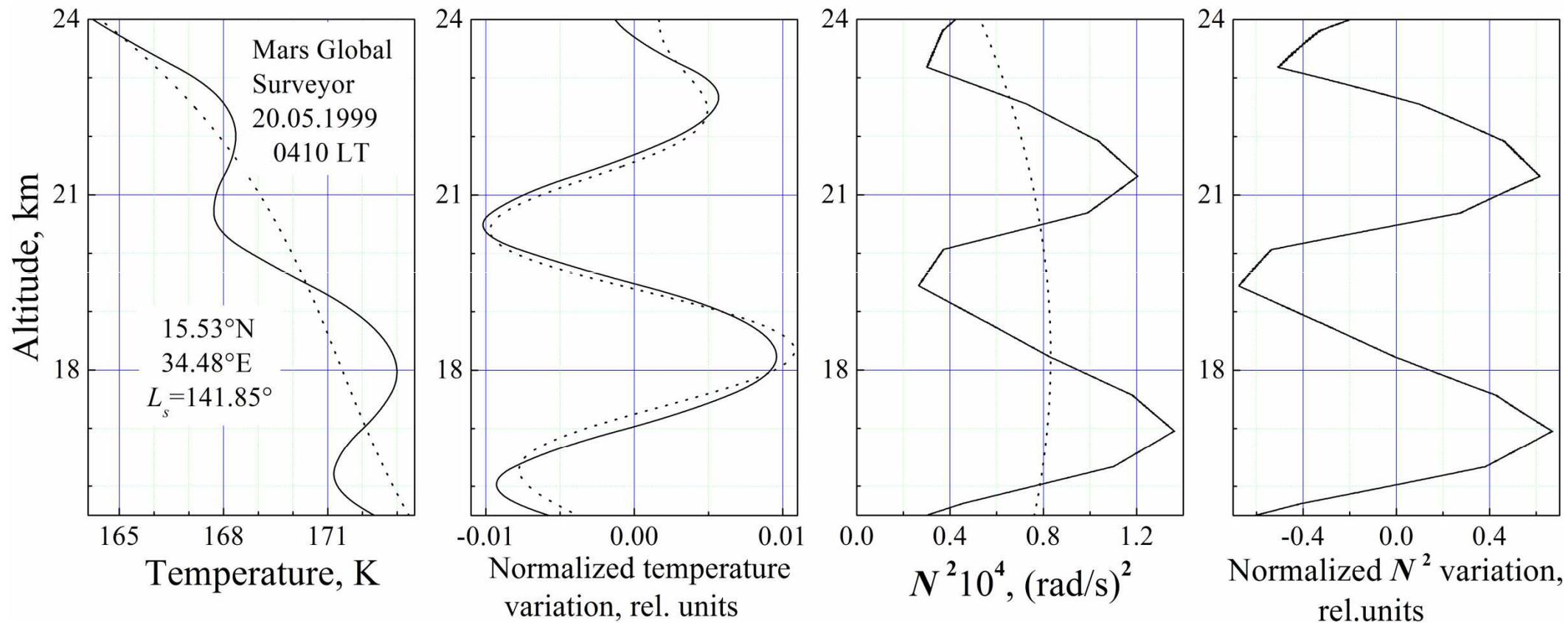


Рис. 4. Пример квазипериодических вариаций температуры в вертикальном профиле $T(h)$ в атмосфере Марса (файл данных: 9140V32A .TPS), восстановленном по радиозатменным измерениям миссии MGS 20.05.1999 г. Сезон – лето ($L_s = 141.85^\circ$), местное время 04 ч 10 м.

Таблица 1. Параметры ВГВ, реконструированные из анализа профилей температуры миссии MGS в четырех районах атмосферы Марса (угловая скорость вращения Марса $\Omega=7.11 \cdot 10^{-5}$ рад/с). Указаны координаты исследованных районов, время и интервалы волновых наблюдений L , погрешности определяемых параметров, если они $< 100\%$

№ сеанса	1	2	3	4
Параметры ВГВ	28.01.1998 05h 35m LT 25.28° N 127.19° E [15.0÷33.0] km	13.05.1999 04h 13m LT 26.74° N 95.14° W [13.0÷31.0] km	19.05.1999 04h 10m LT 18.11° N 112.65° W [8.0÷26.5] km	20.05.1999 04h 10m LT 15.53° N 34.48° E [15.5÷24.0] km
L , km	18.0	18.0	18.5	8.5
λ_z , km	6.8 ± 0.6	8.2 ± 0.7	6.6 ± 0.6	4.5 ± 0.7
$ \widehat{T} , 10^{-3}$ rel.un.	10.8 ± 1.2	15.0 ± 1.7	19.0 ± 1.4	10.0 ± 1.7
$N_{med}^2, 10^{-4}$ rad ² s ⁻²	0.60 ± 0.34	0.75 ± 0.41	0.71 ± 0.47	0.82 ± 0.39
a_e , rel. un.	0.61 ± 0.36	0.57 ± 0.32	0.95 ± 0.64	0.63 ± 0.34
f/ω , rel. un.	0.90 ± 0.18	0.92 ± 0.14	0.42	0.89 ± 0.19

$\omega, 10^{-4} \text{ rad s}^{-1}$	0.68 ± 0.14	0.70 ± 0.11	1.05	0.43 ± 0.09
T^{in} , hours	25.8 ± 5.3	25.0 ± 3.8	16.6	40.7 ± 8.5
$\tan \varphi'$, rel. un.	260	308 ± 305	88	458
$90^\circ - \varphi'$, deg	0.22	0.19 ± 0.18	0.65	0.13
$ C_{ph}^{in} , \text{ms}^{-1}$	19.1 ± 17.0	28.1 ± 23.7	9.7	14.2 ± 11.7
$ u' , \text{m s}^{-1}$	11.7 ± 4.6	16.1 ± 5.9	9.2 ± 6.5	8.9 ± 3.4
$ v' , \text{m s}^{-1}$	10.5 ± 5.8	14.7 ± 7.0	3.9	7.9 ± 4.3
$ C_{pz}^{in} , 10^{-3} \text{ms}^{-1}$	73.6 ± 16.4	91.2 ± 15.8	110	30.9 ± 8.2
$ w' , 10^{-3} \text{m s}^{-1}$	45.1 ± 35.7	52.2 ± 37.8	105	19.5 ± 14.8
λ_h , km	1770	2520 ± 2490	580	2080
$ C_{gh}^{in} , \text{ms}^{-1}$	3.7 ± 3.3	4.5 ± 3.8	8.0	3.0 ± 2.5
$ C_{gz}^{in} , 10^{-3} \text{ms}^{-1}$	14.4	14.7	90.4	6.6
$E_p, \text{m}^2\text{s}^{-2}$	6.7 ± 4.1	10.4 ± 6.2	17.6 ± 11.9	4.2 ± 2.5
$E, \text{m}^2\text{s}^{-2}$	68.6 ± 53.8	129 ± 95	43.7	39.9 ± 30.2
$p = E_k/E_p$, rel. un.	9.2	11.4	1.4	8.4
$ F_h , \text{m}^3\text{s}^{-3}$	257	586	342	120
$ F_z , \text{m}^3\text{s}^{-3}$	1.0	1.9	3.9	0.3
$ F_{ph} , \text{m}^2\text{s}^{-2}$	0.26 ± 0.23	0.42 ± 0.34	0.48	0.09 ± 0.07

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан новый метод определения параметров ВГВ на основе анализа данных индивидуального вертикального профиля температуры в атмосфере планеты. Данный метод не требует дополнительной информации и может быть использован для анализа вертикальных профилей температуры, полученных разными способами.
2. Сформулирован и обоснован критерий идентификации ВГВ, в случае выполнения которого наблюдаемые флуктуации температуры могут рассматриваться как волновые проявления.
3. Установлено, что наиболее точная реконструкция волновых параметров достигается в случае низкочастотных ВГВ, когда значения относительных амплитудных порогов существенно отличаются от единицы.
4. Применение разработанного метода к радиозатменным данным миссии Mars Global Surveyor дало возможность идентифицировать ВГВ в стратосфере Марса и определить величины ключевых волновых параметров, таких как собственная частота внутренних волн, амплитуды вертикальных и горизонтальных возмущений скорости ветра, вертикальная и горизонтальная длина волны, собственная вертикальная и горизонтальная фазовая (и групповая) скорости, кинетическая и потенциальная энергия ВГВ, вертикальные потоки волновой энергии и горизонтального импульса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Creasey, J. E., Forbes, J. M., and Hinson, D. P.: Global and seasonal distribution of gravity wave activity in Mars' lower atmosphere derived from MGS radio occultation data, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L01803, doi: 10.1029/2005GL024037, 2006.

Gubenko, V. N., Pavelyev, A. G., and Andreev, V. E.: Determination of the intrinsic frequency and other wave parameters from a single vertical temperature or density profile measurement, *J. Geophys. Res.*, 113, D08109, doi:10.1029/2007JD008920, 2008.

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.*, 4, 2153-2162, doi:10.5194/amt-4-2153-2011, 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, *Космич. Исслед.*, 50, 1, 23-34, 2012.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!