

# Диагностика степени насыщения внутренних атмосферных волн по данным радиозондовых измерений в атмосфере Земли

*Губенко В.Н., Кириллович И.А.*

*Фрязинский филиал Института радиотехники  
и электроники им. В.А. Котельникова РАН  
e-mail: vngubenko@gmail.com*



**Шестнадцатая Всероссийская открытая конференция  
“Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из  
космоса“  
12 – 16 ноября 2018 года, ИКИ РАН, Москва, Россия**

**ВВЕДЕНИЕ.** Важная роль внутренних гравитационных волн (ВГВ) связана с тем, что они обеспечивают эффективный механизм переноса энергии и импульса из нижних слоев атмосферы в верхние. Большой интерес к ВГВ со стороны специалистов по ионосфере связан с тем, что многие ионосферные процессы и процессы распространения радиоволн хорошо объясняются путем привлечения понятий атмосферных волн. Согласно интерпретации, принятой в настоящее время, перемещающиеся ионосферные возмущения и спорадические E-слои в умеренных широтах представляют собой ионосферное проявление волн в преимущественно нейтральной атмосфере Земли [Gubenko et al., 2018]. Поскольку ВГВ являются характерной особенностью устойчиво стратифицированной по вертикали атмосферы, то аналогичные эффекты можно ожидать в атмосферах Марса и Венеры [Gubenko et al., 2008a; Губенко и др., 2015, 2016a; Yakovlev et al., 1991].

Спутниковые наблюдения в атмосфере радиозатменным методом являются мощным средством для исследований активности ВГВ по всей планете с почти однородным и высоким качеством экспериментальных данных. Однако, радиозатменные исследования внутренних волн в средней атмосфере Земли [Gubenko et al. 2008b, 2011; Губенко и др., 2012, 2016b] используют данные одной системы наблюдения. Обычно это обеспечивает информацию только об одной независимой переменной (температуре или плотности) и обуславливает некоторую неоднозначность описания волнового поля.

Когда две инструментальные системы измерений используются вместе, можно добиться значительно более полного определения характеристик волнового поля и атмосферных эффектов ВГВ. Анализ одновременных данных радиозондов о скорости ветра и температуре позволяет более пристально изучить роль внутренних волн в атмосферной динамике. Зондовые измерения обеспечивают проверку радиозатменных исследований ВГВ, которые используют анализ вариаций температуры или плотности в предположении насыщения волновой амплитуды (разработанный нами SWA-метод (saturated wave assumption)). Изучение одновременных возмущений температуры и скорости ветра дает возможность оценить степень насыщения ВГВ, проверить корректность предположения о насыщении волн и определить эффективность разработанного SWA-метода [Губенко, Кириллович, 2018]. Знание реальных и пороговых волновых амплитуд необходимо при оценке воздействия внутренних волн на невозмущенную атмосферу. Так как предположение о насыщении амплитуды внутренних волн играет ключевую роль при радиофизическом мониторинге ВГВ в атмосферах планет [Gubenko et al., 2008b, 2011; Губенко и др., 2012, 2015, 2016a, b], то радиозондовые исследования процессов насыщения в атмосфере Земли являются актуальными и важными.

**Цель работы:** Представление метода определения фактических и пороговых амплитуд ВГВ, степени насыщения и других характеристик для идентифицированных волн, на основе анализа радиозондовых измерений скорости ветра и температуры SPARC (Stratospheric Processes And their Role in Climate) в атмосфере Земли.

Для достижения минимальных погрешностей в результатах реконструкции характеристик внутренних атмосферных волн предлагается усовершенствованный метод годографа, основанный на комбинированном анализе одновременных измерений скорости ветра и температуры, в котором используется поляризационное соотношение между волновыми вариациями скорости и температуры.

Применение предлагаемого метода является наиболее эффективным в случаях, когда эксцентриситет эллипса поляризации рассматриваемых внутренних атмосферных волн стремится к единице ( $b/a \rightarrow 0$ , эллипс поляризации вырождается в отрезок прямой).

# Определения и основные соотношения для ВГВ

$\omega$  – собственная частота внутренних волн, определяемая в системе отсчета, которая движется со скоростью невозмущенного ветра

$k_h = 2\pi / \lambda_h$ ,  $m = 2\pi / \lambda_z$ , где  $k_h$  ( $\lambda_h$ ) и  $m$  ( $\lambda_z$ ) – горизонтальное и вертикальное волновые числа (длины волн), соответственно

$N_b$  – частота Брента-Вяйсяля (плавучести) для невозмущенной атмосферы

$H = 7$  км – приведенная высота средней атмосферы Земли

## Условия гидростатического режима для ВГВ

$$N_b^2 \gg \omega^2 > f^2, \quad m^2 \gg k_h^2, \quad m^2 \gg (2H)^{-2}$$

## Дисперсионное уравнение для гидростатических ВГВ

[Fritts and Alexander, 2003; Gubenko et al., 2011]

$$\frac{\omega^2}{k_h^2} = \frac{N_b^2}{m^2} \cdot \frac{1}{1 - f^2 / \omega^2} \quad (1)$$

$f = 2\Omega \cdot \sin \phi$  – инерционная частота (параметр Кориолиса)

$\Omega = 7.292 \cdot 10^{-5}$  рад/с – угловая скорость вращения Земли

$\phi$  – географическая широта пункта измерений

# Поляризационные соотношения для ВГВ, энергия которых переносится вверх ( $m < 0$ )

[Zink and Vincent, 2001; Gubenko et al., 2008b, 2011; Губенко и др., 2012, 2015; Губенко, Кириллович, 2018 ]

(случай, когда направление одной из осей декартовой системы координат совпадает с направлением горизонтальной составляющей волнового вектора)

$$v' = -i \cdot \frac{f}{\omega} \cdot u' \quad (2), \quad w' = -\frac{k_h}{m} \cdot u' \quad (3), \quad u' = i \cdot \frac{g}{N_b} \cdot \frac{\hat{T}'}{\sqrt{1 - f^2 / \omega^2}} \quad (4)$$

$u'$  и  $v'$  – комплексные горизонтальные возмущения скорости ветра, направленные параллельно и перпендикулярно горизонтальной компоненте волнового вектора

$w'$  – комплексное возмущение скорости ветра в вертикальном направлении

$\hat{T}' = T' / T_b$  – нормированное комплексное возмущение абсолютной температуры ( $T = t + 273^\circ$ )

$i$  – мнимая единица

# Определения и основные соотношения для ВГВ (продолжение)

Выражение для определения частоты Вьяйсяля-Брента  $N_b$  [Gubenko et al., 2011]

$$N_b^2 = \frac{g}{T_b} \left( \frac{\partial T_b}{\partial z} + \frac{g}{c_p} \right), \quad (5)$$

$g$  – ускорение свободного падения,

$g / c_p = 9.8 \cdot 10^{-3}$  К/м – сухоадиабатический градиент температуры,

$T_b$  – невозмущенная (средняя) абсолютная температура

Определение отношения инерционной частоты ВГВ к собственной частоте ( $f/\omega$ ) для радиозондовых измерений в атмосфере Земли

$$\frac{|f|}{|\omega|} = \frac{|v'|}{|u'|} = \sqrt{1 - \frac{g}{N_b} \cdot \frac{|\hat{T}'|}{|u'|}}, \quad (6)$$

следует из (2)      следует из (4)

$|u'|$  и  $|v'|$  – амплитуды горизонтальных возмущений скорости, направленных вдоль вектора  $\mathbf{k}_h$  и в поперечном направлении определяются длинами большой и малой полуосей эллипса поляризации ВГВ, соответственно

# Определения и соотношения для ВГВ

$(c - \bar{u}) = c_{ph}^{in} = \omega / k_h$  – собственная горизонтальная фазовая скорость ВГВ

$c$  – горизонтальная фазовая скорость волны в системе отсчета земного наблюдателя (неподвижная система отсчета)

$\bar{u}$  – проекция невозмущенной скорости ветра  $V_b$  на направление горизонтальной составляющей  $k_h$  волнового вектора

$c_{pz}^{in} = \omega / m$  – собственная вертикальная фазовая скорость ВГВ

$\sigma = \omega + \mathbf{k}_h \cdot \mathbf{V}_b = \omega + |\mathbf{k}_h| \cdot |\mathbf{V}_b| \cdot \cos(\angle \mathbf{k}_h, \mathbf{V}_b)$  – частота волны в системе отсчета земного наблюдателя

$T^{in} = 2\pi / \omega$  – собственный период внутренней волны

$T = 2\pi / \sigma$  – период волны в системе земного наблюдателя

# Теоретические соотношения и определения

Выражение для вычисления относительной пороговой амплитуды  $a$  динамической (сдвиговой) неустойчивости [Fritts, 1989]

$$a = \frac{|u'_{sat}|}{|c - \bar{u}|} = \frac{2 \cdot \sqrt{1 - f^2 / \omega^2}}{1 + \sqrt{1 - f^2 / \omega^2}} \quad (7)$$

$|u'_{sat}|$  – насыщенная амплитуда горизонтальных возмущений скорости ветра, направленных вдоль  $\mathbf{k}_h$

Выражения для определения независимых оценок  $a_e$  и  $a_u$  относительной волновой амплитуды [Gubenko et al., 2011; Губенко, Кириллович, 2018]

$$a_u = \frac{|u'|}{|c - \bar{u}|} = \frac{|u'| \cdot |m|}{N_b} \cdot \sqrt{1 - \frac{f^2}{\omega^2}}, \quad a_e = \frac{|u'|}{|c - \bar{u}|} = \frac{g|m|}{N_b^2} \cdot |\hat{T}'| = \frac{2\pi \cdot g}{\lambda_z N_b^2} \cdot |\hat{T}'| \quad (8)$$

Величина  $a_e$  вычисляется на основе анализа только температурных данных, в то время как при определении  $a_u$  используются измерения скорости и температуры

Выражения для вычисления степени насыщения ВГВ по данным анализа радиозондовых измерений [Gubenko et al., 2011; Губенко, Кириллович, 2018]

$$d_u = \frac{|u'|}{|u'_{sat}|} = \frac{a_u}{a}, \quad d_e = \frac{|u'|}{|u'_{sat}|} = \frac{a_e}{a} \quad (9)$$

# Экспериментальные данные

Для демонстрации возможностей предложенного метода, рассмотрим пример его практического применения к анализу одновременных баллонных измерений температуры и скорости ветра в атмосфере Земли.

Данные указанных измерений находятся в свободном доступе на сайте Центра данных SPARC (<http://www.sparc.sunysb.edu/>).

Регистрация измерений проводилась с интервалами в 6 секунд, что соответствует вертикальному разрешению данных  $\sim 30$  м при средней скорости подъема аэростата  $\sim 5$  м/с.

Точность измерений температуры и скорости ветра составляют  $\sim 0.2$  К и  $\sim 1$  м/с, соответственно.

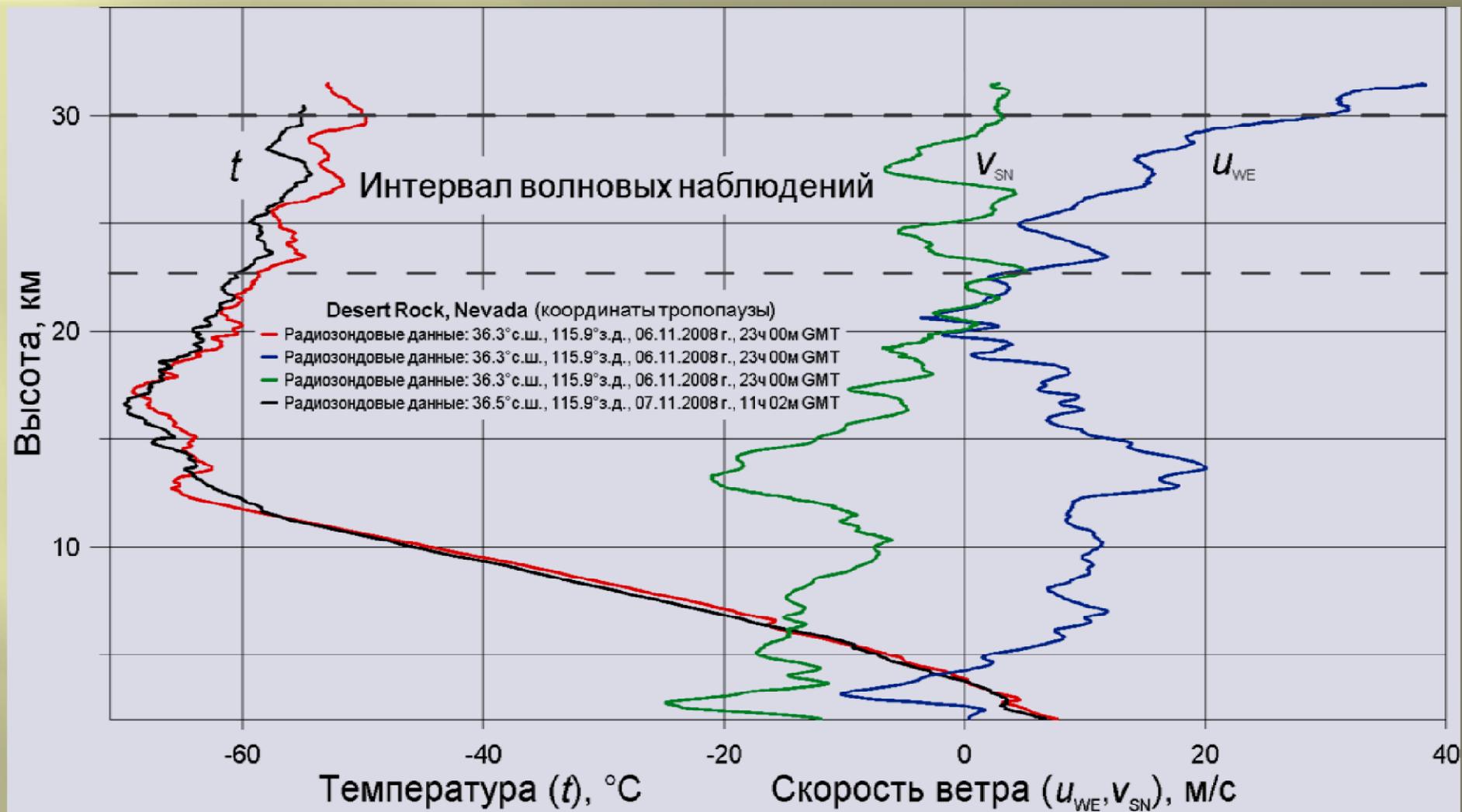
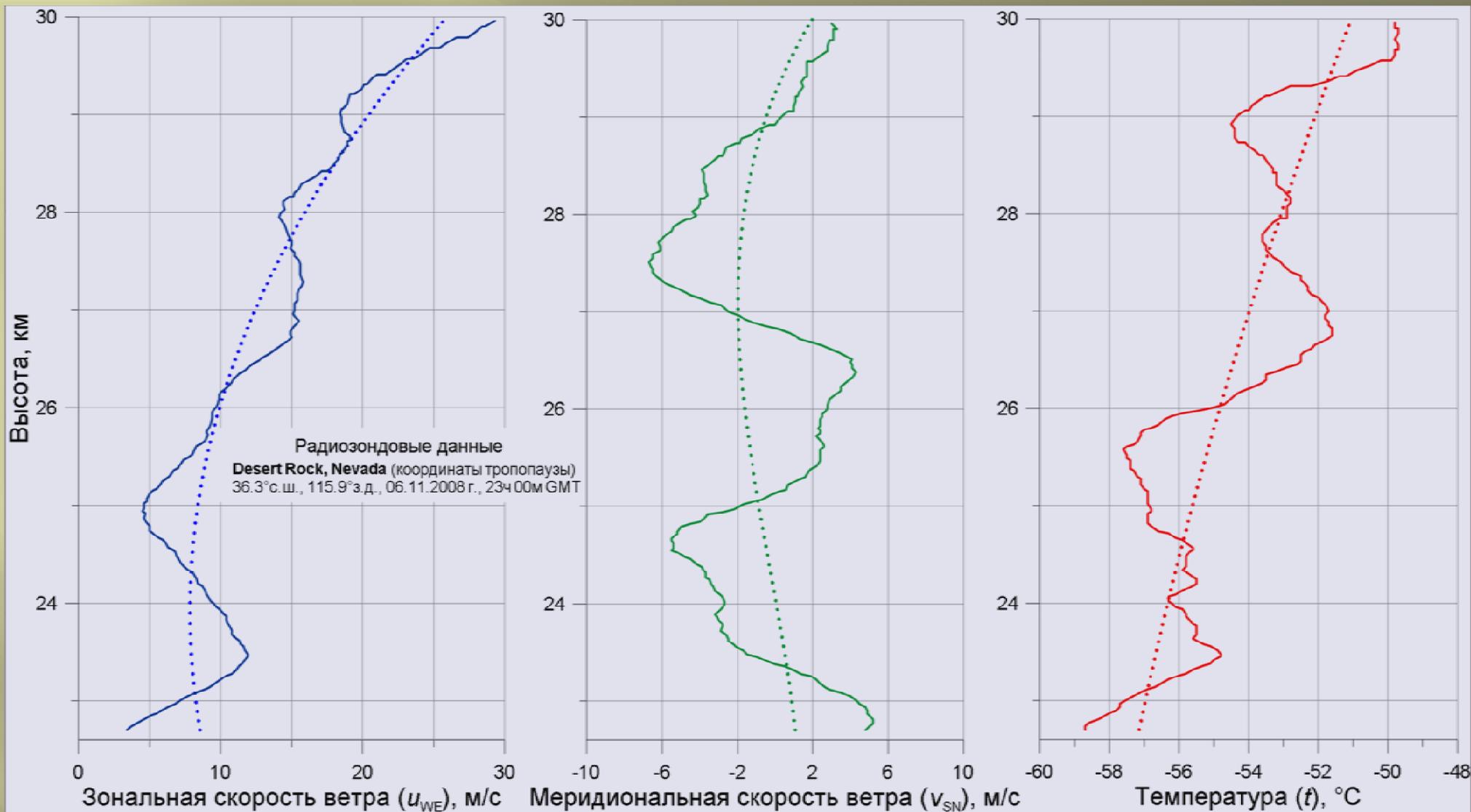
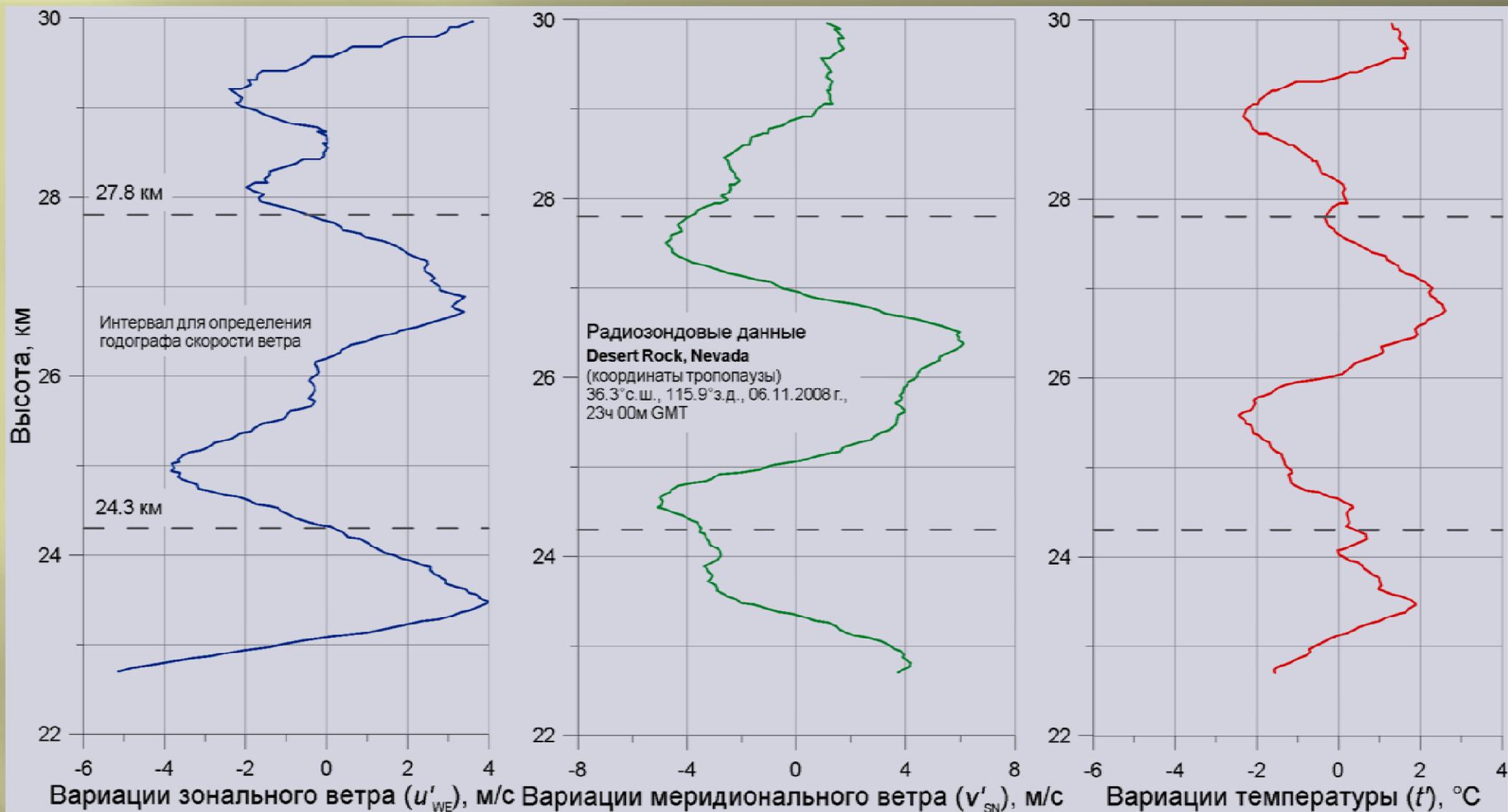


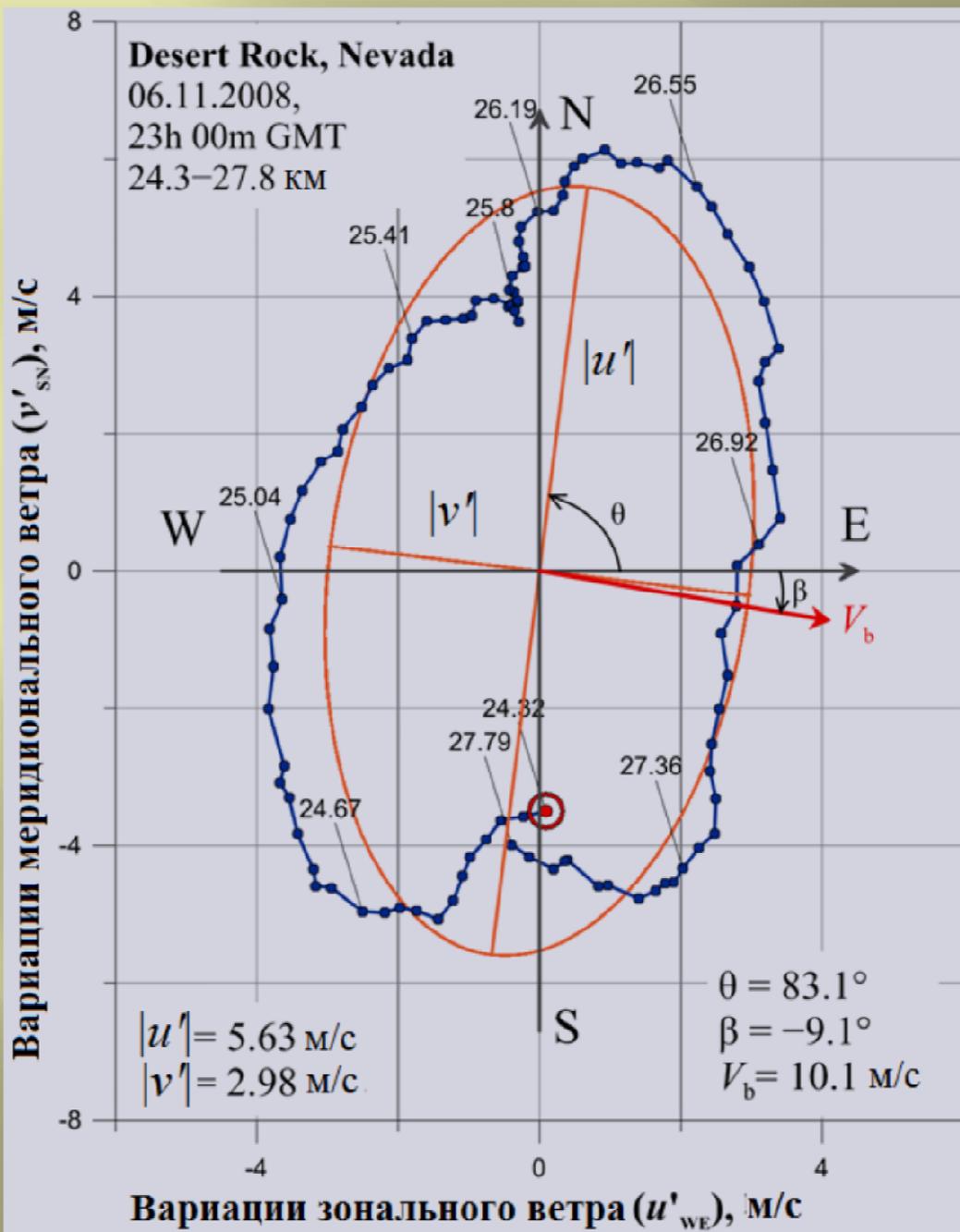
Рис. 1. Вертикальные профили температуры ( $t$ ), зональной ( $u_{WE}$ ) и меридиональной ( $v_{SN}$ ) составляющих скорости ветра, полученные в радиозондовых измерениях в атмосфере над районом **Desert Rock, Nevada**. Приведены координаты зондируемого района атмосферы и среднее время проведения измерений (по Гринвичу).



**Рис. 2.** Высотные профили температуры, зональной и меридиональной компонент скорости ветра, полученные **06.11.2008** г. в радиозондовых измерениях над районом **Desert Rock**. Пунктиром показаны невозмущенные (средние) профили, вычисленные методом МНК-аппроксимации оригинальных данных на интервале волновых наблюдений (см. Рис. 1).



**Рис. 3.** Высотные профили вариаций температуры и составляющих скорости ветра, полученные из радиозондовых измерений **06.11.2008** г. над районом **Desert Rock**. Значения вариаций на данной высоте определялись как разность оригинальных и соответствующих средних значений (см. Рис. 2). Интервал для определения годографа вариаций скорости ветра (**24.3 – 27.8 км**) обозначен штриховыми линиями.



**Рис. 4.** Годограф вариаций скорости ветра, обусловленных внутренними волнами, для интервала высот **24.3 – 27.8 км** (точки – оригинальные данные, гладкая сплошная – эллипс МНК-аппроксимации данных,  $\odot$  – начальная точка годографа, числа вблизи точек указывают высоты). Стрелкой показано направление средней скорости ветра ( $V_b$ ) на высоте **26 км**. Вращение вектора вариаций скорости ветра по часовой стрелке, по мере увеличения высоты, соответствует распространению фазы вниз и направленной вверх составляющей групповой скорости (волновая энергия переносится вверх).

# Полученные результаты и заключение

1. Определены амплитуды волновых вариаций температуры  $|T'| \approx 2.47$  К, горизонтальных  $|u'| = 5.63$  м/с,  $|v'| = 2.98$  м/с и вертикальных  $|w'| = 3.6 \cdot 10^{-2}$  м/с возмущений скорости ветра. Найдена вертикальная  $\lambda_z = 3.4$  км и горизонтальная  $\lambda_h = 535$  км длина волны для исследуемых ВГВ и получена оценка параметра стабильности атмосферной стратификации  $N_b \approx 2.18 \cdot 10^{-2}$  рад/с ( $T_b(26 \text{ км}) = 218$  К).
2. Анализ годографа показывает вращение вектора вариаций скорости ветра по часовой стрелке с увеличением высоты, что свидетельствует о присутствии ВГВ в атмосфере и переносе **вверх** волновой энергии для **Северного полушария** планеты. Найдено, что идентифицированная низкочастотная ВГВ ( $f/\omega \approx 0.53$ ) является ненасыщенной волной (степень насыщения составляет около 44%÷47%), а ее период  $T$  в неподвижной системе отсчета примерно совпадает с собственным периодом  $T^{in}$  и равен  $\sim 10.7$  часа. Определены значения собственной горизонтальной  $|c - \bar{u}| = c_{ph}^{in} \approx 13.9$  м/с и вертикальной фазовой скорости  $c_{pz}^{in} \approx 8.8 \cdot 10^{-2}$  м/с.
3. Проведенный нами анализ показывает, что **усовершенствованный метод годографа** позволяет надежно идентифицировать ВГВ в данных радиозондовых измерений, определять характеристики и степень насыщения внутренних волн в атмосфере Земли. **Исследование процессов насыщения важно для проверки результатов радиозатменного мониторинга волновой активности в атмосфере Земли, для которого предположение о насыщении амплитуды атмосферных ВГВ является ключевым.**

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Программы 28 Президиума Российской Академии Наук.*

# Список литературы

- 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.
- 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. 46–49.
- 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. 80–85.
- 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.
- 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.
- Fritts D.C., Alexander M.J. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere // Rev. Geophys. 2003. Vol. 41. No. 1, 1003, doi:10.1029/2001RG000106.
- Gubenko, V.N., Andreev, V.E., Pavelyev, A.G. Detection of layering in the upper cloud layer of Venus northern polar atmosphere observed from radio occultation data // Journal of Geophysical Research. 2008a. Vol. 113. No. E03001, doi: 10.1029/2007JE002940.
- 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. 2008b. 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.
- 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.
- Yakovlev, O.I., Matyugov, S.S., Gubenko, V.N. Venera-15 and -16 middle atmosphere profiles from radio occultations: Polar and near-polar atmosphere of Venus // Icarus. 1991. Vol. 94. No. 2. P. 493–510, doi: 10.1016/0019-1035(91)90243-M.
- Zink F., Vincent R.A. Wavelet analysis of stratospheric gravity wave packets over Macquarie Island, 1. Wave parameters // J. Geophys. Res. 2001. Vol. 106, No. D10. P. 10275 – 1028.

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**