

РАДИОЗОНДОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ (на конкурс)

Кириллович И.А., Губенко В.Н.

*Фрязинский филиал Института радиотехники
и электроники им. В.А. Котельникова РАН*

Пятнадцатая Всероссийская открытая конференция “Современные
проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”
13 – 17 ноября 2017 года, ИКИ РАН, Москва, Россия

Тринадцатая Всероссийская Школа-конференция молодых ученых
по фундаментальным проблемам дистанционного зондирования
Земли из космоса

ВВЕДЕНИЕ. Внутренние гравитационные волны (ВГВ) заметно влияют на структуру и циркуляцию атмосферы Земли благодаря эффективному переносу энергии и импульса с ее нижних уровней на верхние. Так как внутренние волны являются характерной особенностью устойчиво стратифицированной атмосферы, то аналогичные эффекты можно ожидать в атмосферах Венеры и Марса [Yakovlev et al., 1991; Gubenko and Andreev, 2003, 2007; Gubenko et al., 2008a; Губенко и др., 2015, 2016a]. Источниками генерации ВГВ в атмосферах планет могут быть тепловые контрасты вблизи поверхности, топография, сдвиговая неустойчивость ветра, конвекция и фронтальные процессы. Наблюдения флуктуаций температуры и скорости ветра в средней атмосфере Земли показали, что волновые амплитуды возрастают с увеличением высоты, однако недостаточно быстро, чтобы соответствовать их росту из-за экспоненциального уменьшения плотности в отсутствие диссипации энергии. Линейная теория внутренних волн объясняет это замедление темпа роста амплитуды (насыщение волновой амплитуды) следующим образом: если при распространении ВГВ ее амплитуда превысит пороговую величину, то это будет приводить к атмосферной неустойчивости, а также к возникновению турбулентности и диссипации энергии, что будет препятствовать дальнейшему увеличению волновой амплитуды. Полагают, что сдвиговая и конвективная неустойчивости являются теми механизмами, которые вносят наибольший вклад в диссипацию энергии и насыщение внутренних волн в атмосфере.

Для волн с высокими собственными частотами, пороговые амплитуды сдвиговой и конвективной неустойчивости практически совпадают и примерно равны единице. Однако для низкочастотных ВГВ, собственная частота которых близка к инерционной частоте, пороговая величина сдвиговой неустойчивости оказывается существенно ниже ее аналога для конвективной неустойчивости. Исследования процессов насыщения внутренних волн, а также определения реальной и пороговой волновой амплитуды важны при определении эффектов ВГВ в невозмущенной атмосфере. Положение о насыщении внутренних волн играет ключевую роль при радиозатменном мониторинге ВГВ в атмосферах планет [Gubenko et al., 2008b; 2011; Губенко и др., 2012, 2015, 2016а, б], поэтому радиозондовые исследования внутренних волн в атмосфере Земли являются актуальной задачей.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: Определение и анализ реальных и пороговых волновых амплитуд, степени насыщения и других характеристик идентифицированных ВГВ, полученных на основе обработки высокоточных радиозондовых измерений (SPARC) скорости ветра и температуры в атмосфере Земли (<http://www.sparc.sunysb.edu/>). Обсуждаются приложения зондовых исследований ВГВ для задач радиозатменного мониторинга внутренних волн в атмосферах планет.

Определения и основные соотношения для ВГВ

ω – 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 (λ_h) и m (λ_z) – горизонтальное и вертикальное волновое число (длина волны), соответственно

N_b – частота Брента-Вяйсяля (плавучести) в невозмущенной атмосфере

$H = 7$ 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

ϕ – 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]

(одна из осей декартовой системы координат направлена вдоль 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 Вайсяля-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 – адиабатический градиент температуры в атмосфере Земли,

T_b – невозмущенная (средняя) абсолютная температура.

Выражение для определения “осевого отношения” (AXR)

$$\text{AXR} = \frac{|v'|}{|u'|} = \frac{|f|}{|\omega|}, \quad (6)$$

$|u'|$ 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 \mathbf{V}_b на направление горизонтальной составляющей \mathbf{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]

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

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 двумя разными способами [Gubenko et al., 2011]

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

Экспериментальные данные

Для демонстрации возможностей изложенной методики, рассмотрим пример ее 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 ~ 30 м при средней скорости подъема аэростата ~ 5 м/с.

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

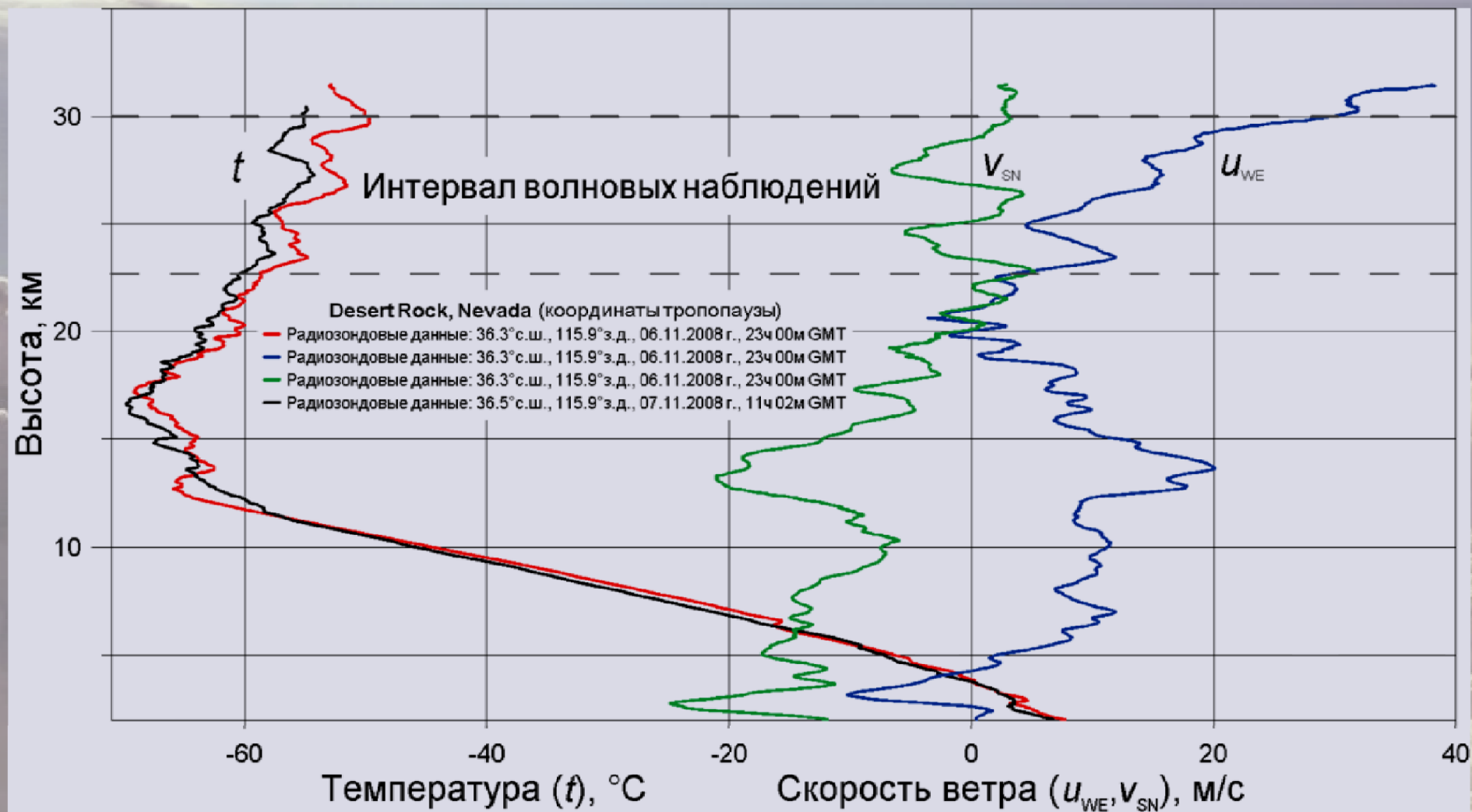


Рис. 1. Вертикальные профили температуры (t), зональной (u_{WE}) и меридиональной (v_{SN}) составляющих скорости ветра, полученные в радиозондовых измерениях в атмосфере над районом **Desert Rock, Nevada**. Приведены координаты зондируемого района атмосферы и среднее время проведения измерений (по Гринвичу).

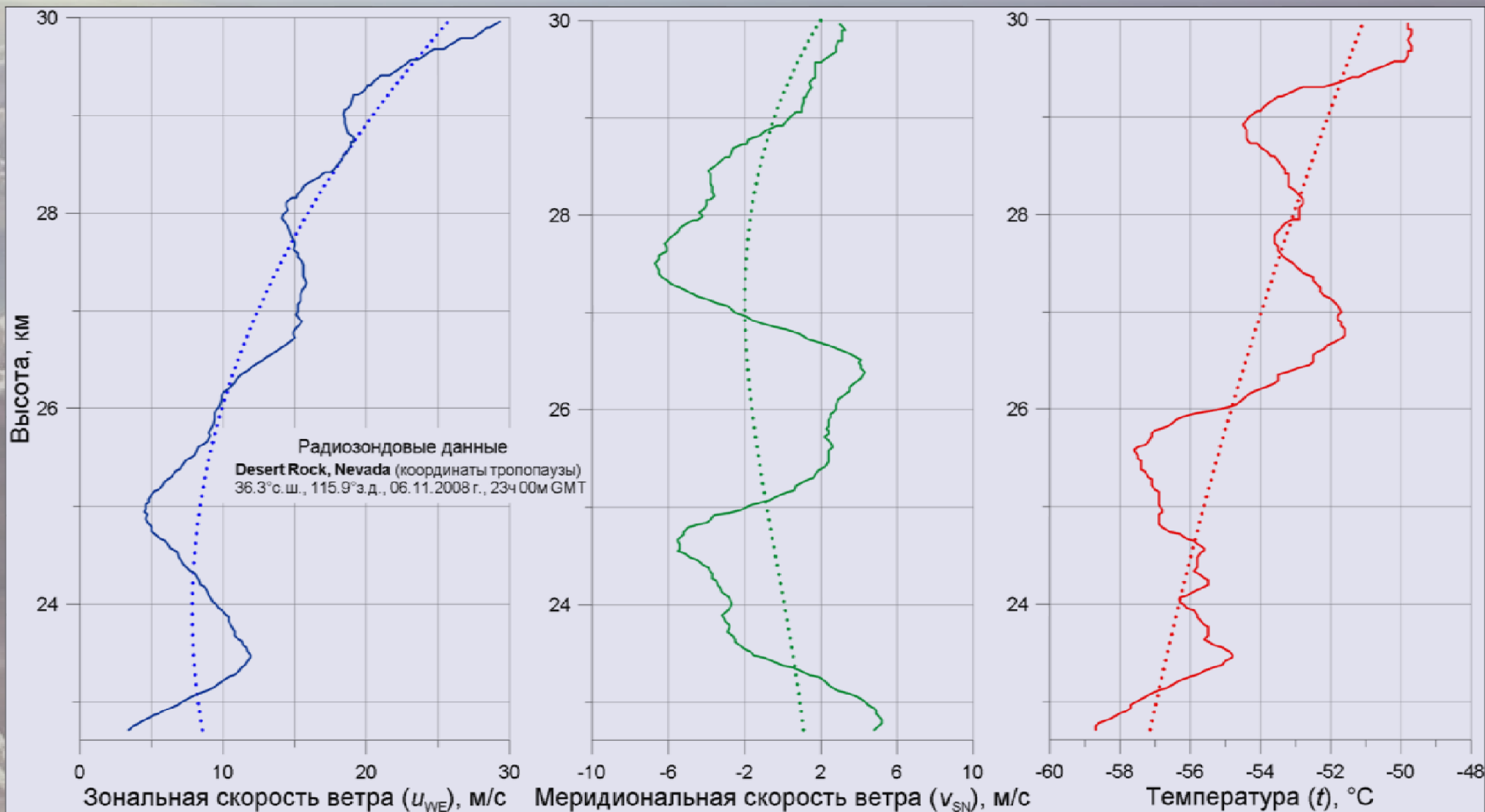


Рис. 2. Высотные профили температуры, зональной и меридиональной компонент скорости ветра, полученные **06.11.2008** г. в радиозондовых измерениях над районом **Desert Rock**. Пунктиром показаны невозмущенные (средние) профили, вычисленные методом МНК-аппроксимации оригинальных данных на интервале волновых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

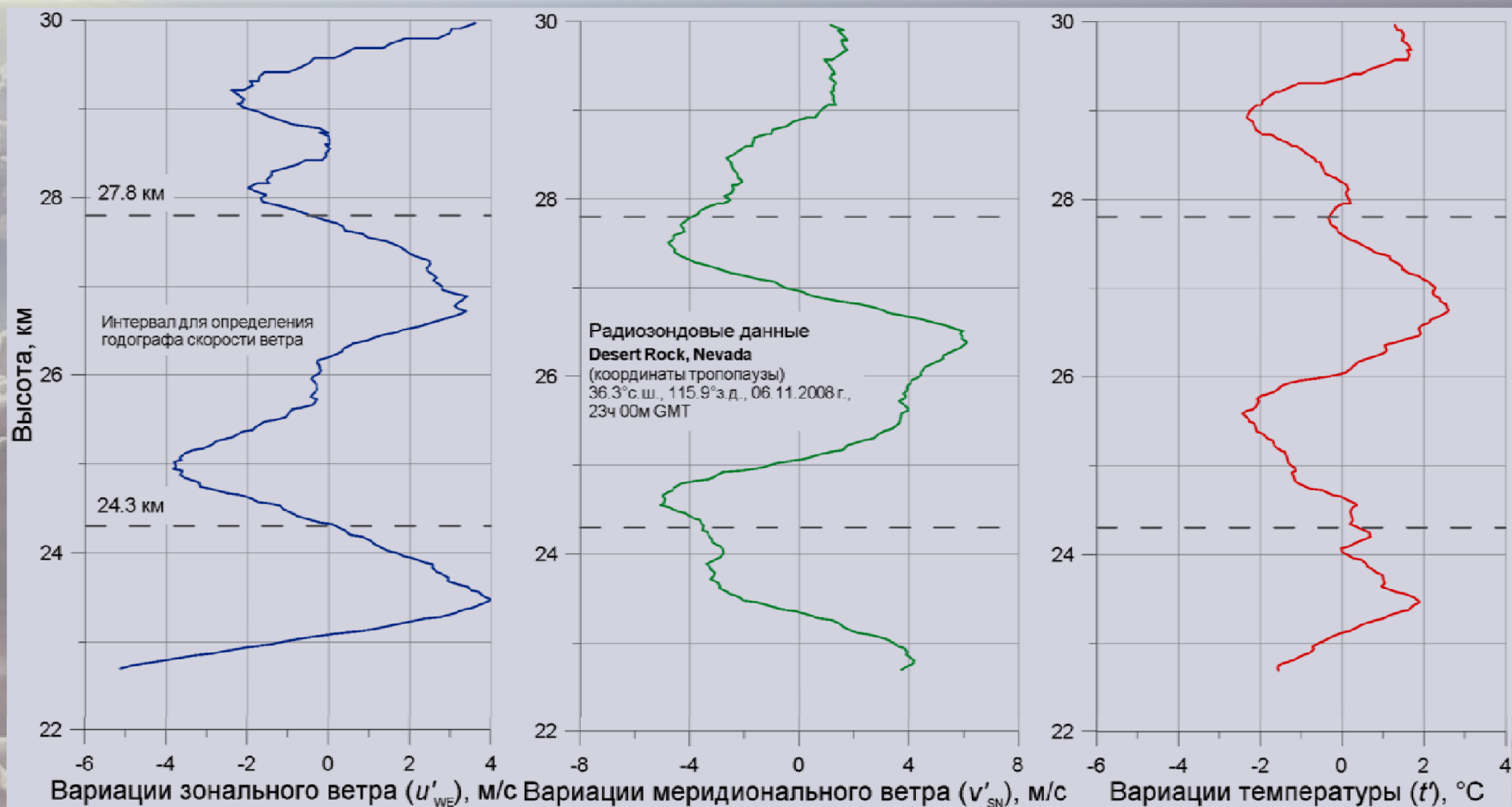


Рис. 3. Высотные профили вариаций температуры и составляющих скорости ветра, полученные из радиозондовых измерений **06.11.2008** г. над районом **Desert Rock**. Значения вариаций на данной высоте определялись как разность оригинальных и соответствующих средних значений (см. **Рис. 2**). Интервал для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

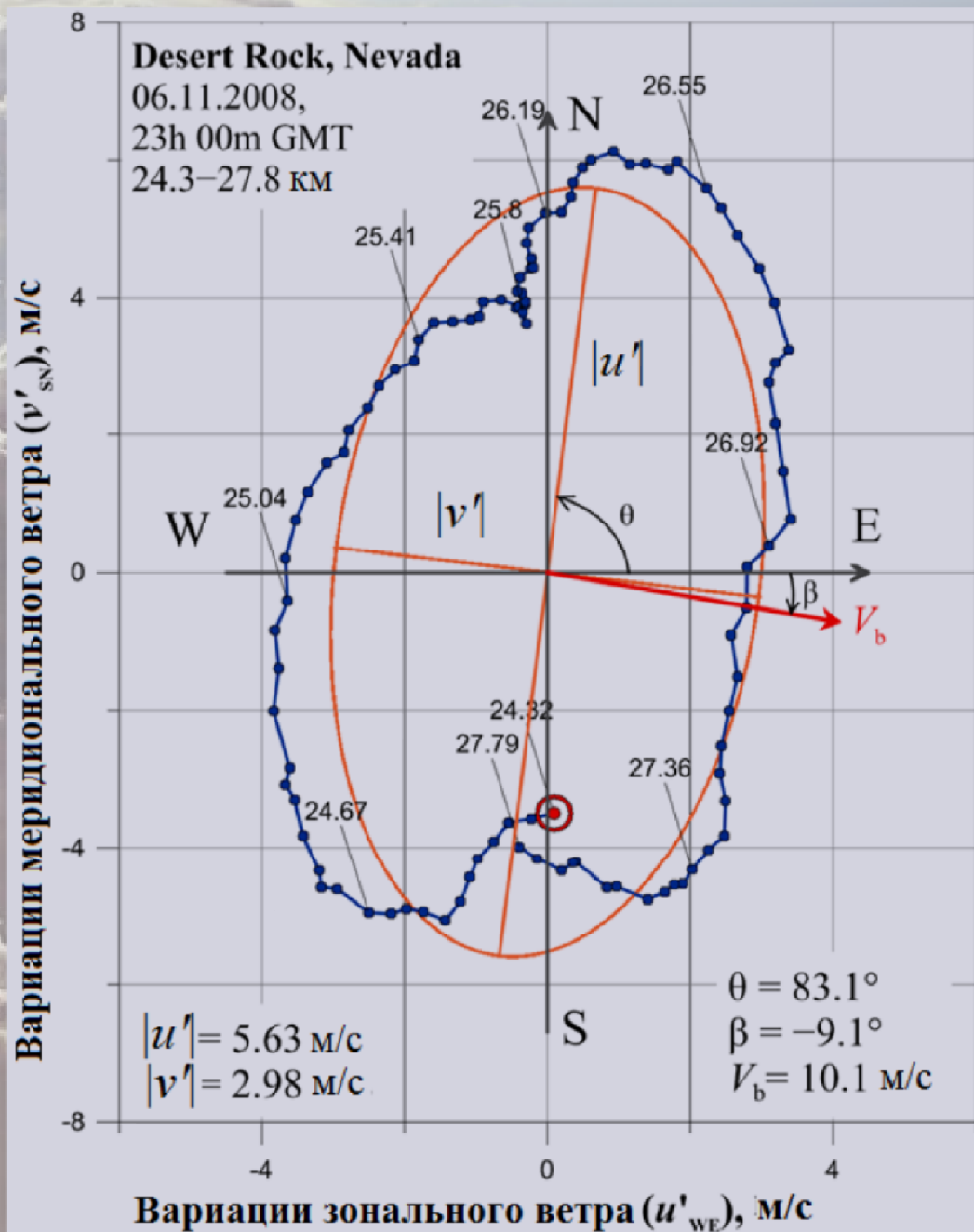


Рис. 4. Годограф вариаций скорости ветра, обусловленных внутренними волнами, для интервала высот **24.3 – 27.8 км** (точки – оригинальные данные, гладкая сплошная – эллипс МНК-аппроксимации данных, \odot – начальная точка годографа, числа вблизи точек указывают высоты). Стрелкой показано направление 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 $44\% \div 47\%$), а ее период в неподвижной системе отсчета T примерно совпадает с собственным периодом T^{in} и равен ~ 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 метод годографа позволяет 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 1.7 Президиума РАН.

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. *Космич. исслед.* 50, 23–34, 2012.
- 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. *Космич. исслед.* 53, 141–151, doi: 10.7868/S0023420615020028, 2015.
- 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.* 59 (12/2), 45–48, ISSN 0021-3411, 2016а.
- 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.* 59 (12/3), 79–83, ISSN 0021-3411, 2016б.
- Fritts D.C. A review of gravity wave saturation processes, effects, and variability in the middle atmosphere // *Pure Appl. Geophys.* 130. 343–371, 1989.
- Fritts D.C., Alexander M.J. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere // *Rev. Geophys.* 41(1), 1003, doi:10.1029/2001RG000106, 2003.
- Gubenko, V.N., Andreev, V.E. Radio wave fluctuations and layered structure of the upper region of Venusian clouds from radio occultation data. *Cosmic Res.* 41, 135–140, doi: 10.1023/A:1023378829327, 2003.
- Gubenko, V.N., Andreev, V.E. The identification of the fluctuation effects related to the turbulence and "permanent" layers in the atmosphere of Venus from radio occultation data. *Astron. Astrophys. Trans.* 26, 507–515, doi: 10.1080/10556790701610399, 2007.
- 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. *J. Geophys. Res.* 113. E03001, doi: 10.1029/2007JE002940, 2008а.
- 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. *J. Geophys. Res.* 113, D08109, doi:10.1029/2007JD008920, 2008б.
- 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. *Atmos. Meas. Tech.* 4, 2153–2162, doi:10.5194/amt-4-2153–2011, 2011.
- 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* 94, 493–510, doi: 10.1016/0019-1035(91)90243-M, 1991.
- Zink F., Vincent R.A. Wavelet analysis of stratospheric gravity wave packets over Macquarie Island, 1. Wave parameters // *J. Geophys. Res.* 106(D10), 10275 – 1028, 2001.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ