

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК
ВНУТРЕННИХ ВОЛН В СТРАТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ ПО
ДАНЫМ АНАЛИЗА РАДИОЗОНДОВЫХ
ИЗМЕРЕНИЙ**

Кириллович И.А., Губенко В.Н.

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

**МЕЖДУНАРОДНАЯ БАЙКАЛЬСКАЯ МОЛОДЕЖНАЯ НАУЧНАЯ ШКОЛА ПО
ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКЕ**

"ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В КОСМОСЕ И ОКОЛОЗЕМНОЙ СРЕДЕ"

XV Конференция молодых ученых

"Взаимодействие полей и излучения с веществом"

Иркутск, 11-16 сентября 2017 г.

ВВЕДЕНИЕ Фундаментальной задачей физики атмосферы является исследование волновых процессов, которые определяют атмосферную динамику. Известно, что внутренние гравитационные волны (ВГВ) обеспечивают эффективный перенос энергии и импульса с нижних уровней земной атмосферы на верхние. Поскольку ВГВ являются характерной особенностью стабильно стратифицированной по вертикали атмосферы, то аналогичные эффекты можно ожидать и в атмосферах других планет [*Gubenko et al.*, 2008a, 2015]. Потенциальными источниками внутренних волн в атмосфере являются тепловые контрасты вблизи поверхности, топография, сдвиговая неустойчивость ветра, конвекция и фронтальные процессы [*Fritts, Alexander*, 2003]. Исследования волновых вариаций температуры и скорости ветра в атмосфере Земли показали, что амплитуды возмущений возрастают с увеличением высоты, однако недостаточно быстро, чтобы соответствовать их росту из-за экспоненциального уменьшения плотности с высотой в отсутствие диссипации энергии.

Теория объясняет это замедление темпа роста амплитуды следующим образом: по мере распространения волны вверх, диссипация волновой энергии происходит таким образом, что амплитуда ВГВ поддерживается на уровне порога сдвиговой (Кельвина-Гельмгольца) неустойчивости в атмосфере (насыщение волновой амплитуды). При радиозатменном мониторинге волновой активности в атмосферах планет используется ключевое предположение о насыщении волновой амплитуды [Gubenko et al., 2008b, 2011, 2012, 2015], поэтому зондовые исследования ВГВ важны для проверки полученных результатов.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: Идентификация волновых событий, определение характеристик и степени насыщения ВГВ по данным одновременных зондовых измерений температуры и скорости ветра в атмосфере Земли. Основные соотношения для внутренних волн и описание метода годографа скорости ветра, которые использовались нами для анализа, представлены в работах [Gubenko et al., 2008b, 2011, 2012, 2015; Zink, Vincent, 2001].

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 ($m < 0$)

[Pfister et al., 1993; Zink and Vincent, 2001; Gubenko et al., 2008b, 2011, 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.

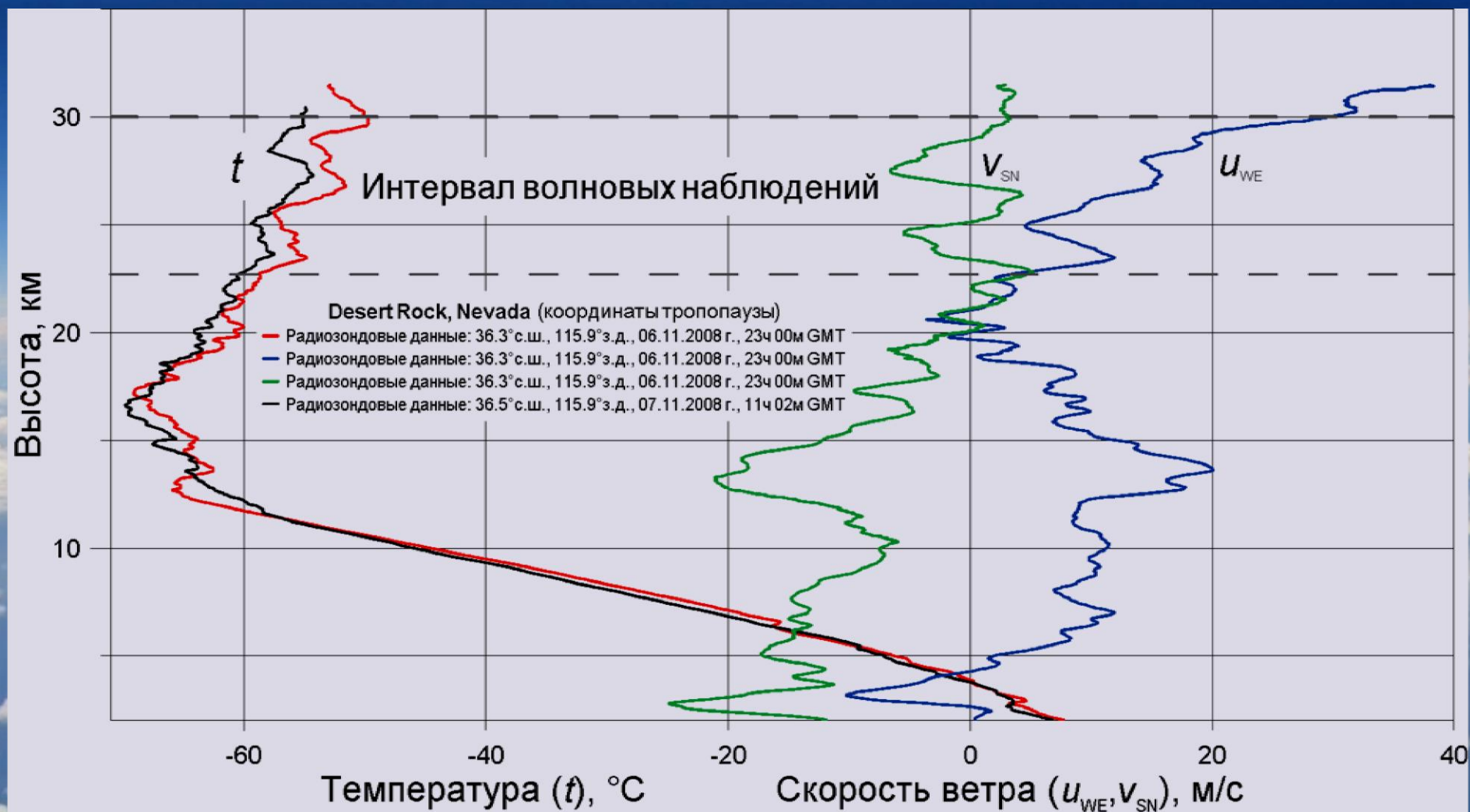


Рис. 1. Вертикальные профили температуры (t), зональной (u_{WE}) и меридиональной (v_{SN}) составляющих скорости ветра, полученные в радиозондовых измерениях в атмосфере над районом **Desert Rock, Nevada**. Приведены координаты зондируемого района атмосферы и среднее время проведения измерений (по Гринвичу).

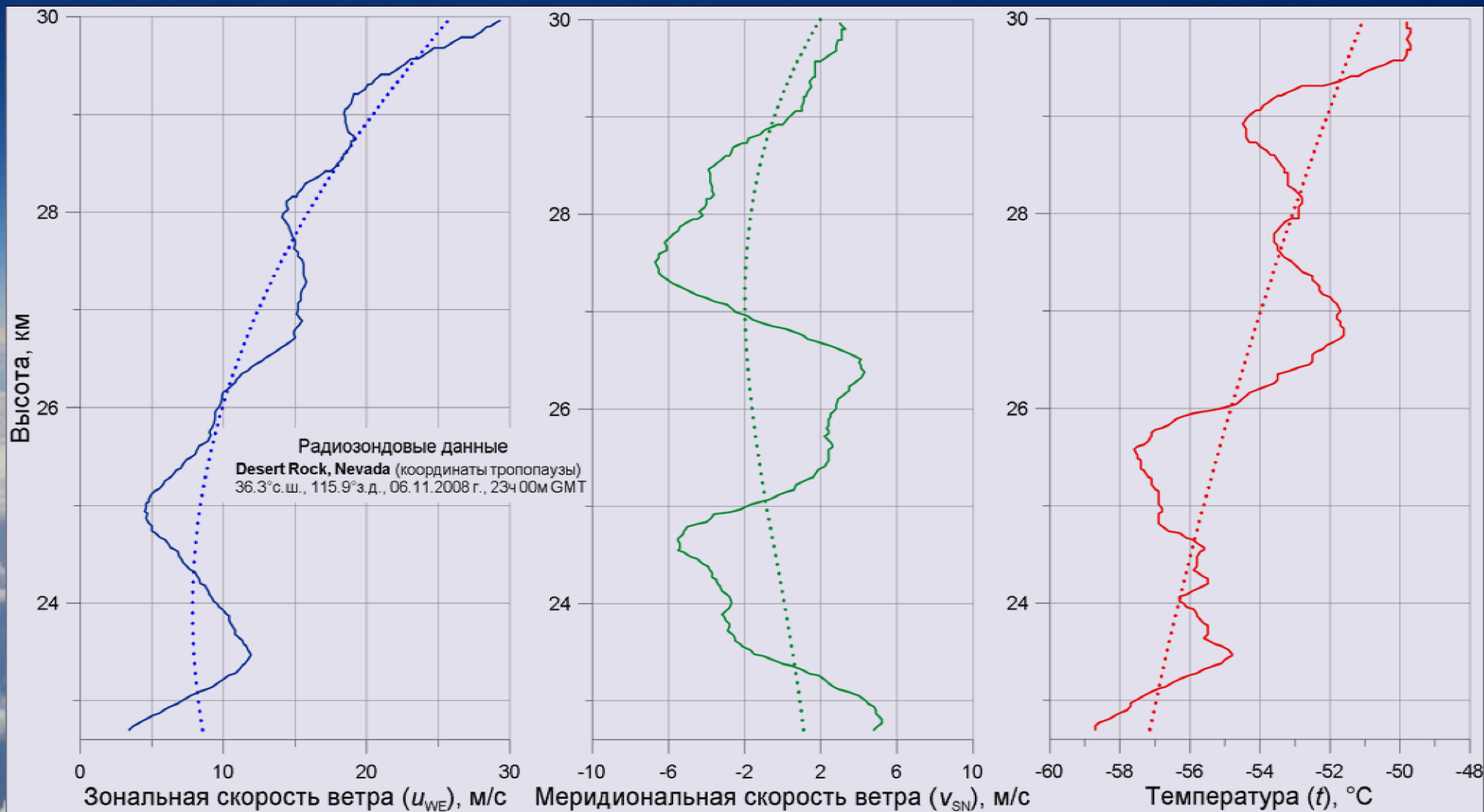


Рис. 2. Высотные профили температуры, зональной и меридиональной компонент скорости ветра, полученные **06.11.2008** г. в радиозондовых измерениях над районом **Desert Rock**. Пунктиром показаны невозмущенные (средние) профили, вычисленные методом МНК-аппроксимации оригинальных данных на интервале волновых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

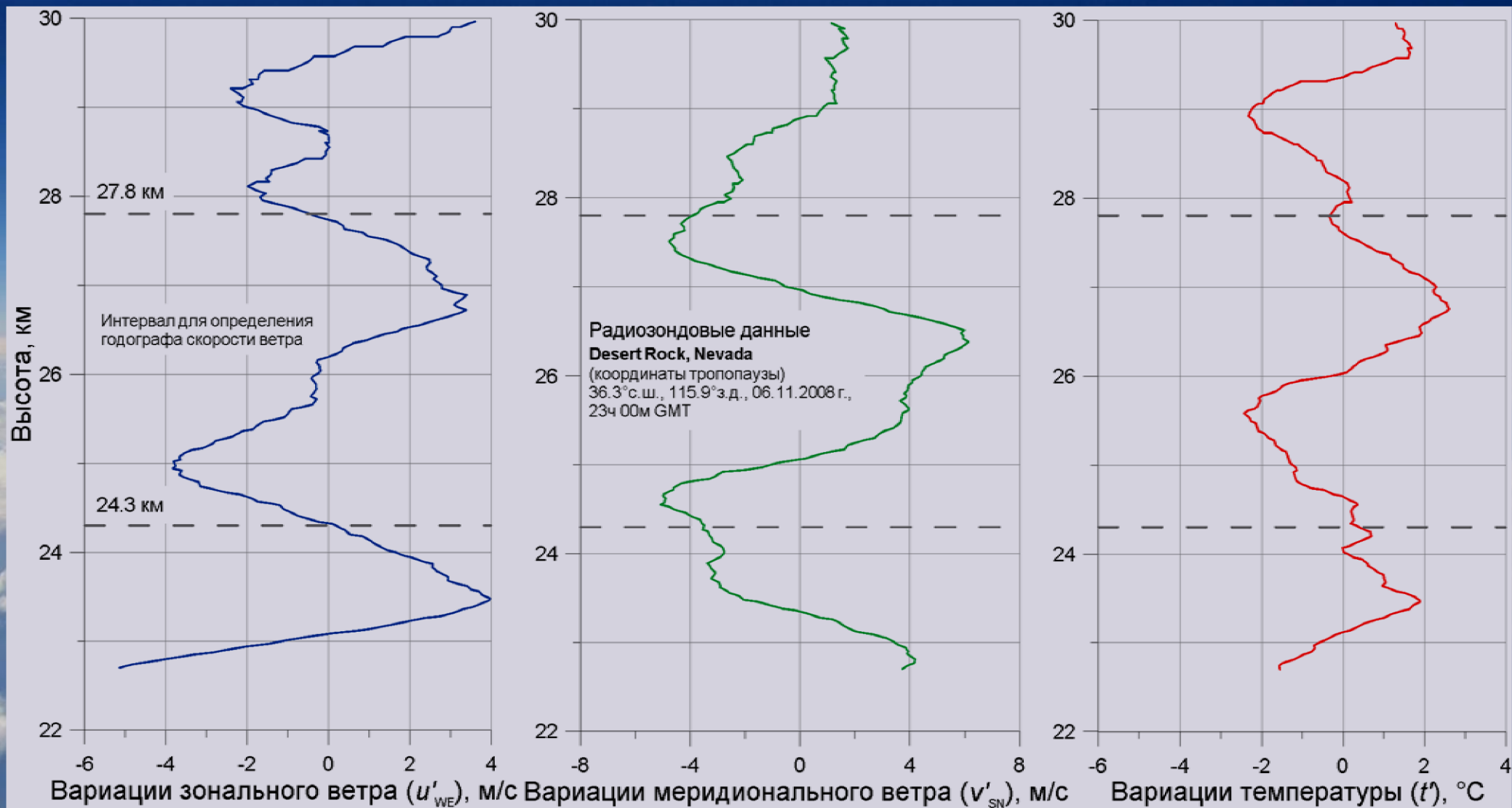


Рис. 3. Высотные профили вариаций температуры и составляющих скорости ветра, полученные из радиозондовых измерений **06.11.2008** г. над районом **Desert Rock**. Значения вариаций на данной высоте определялись как разность оригинальных и соответствующих средних значений (см. Рис. 2). Интервал для определения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

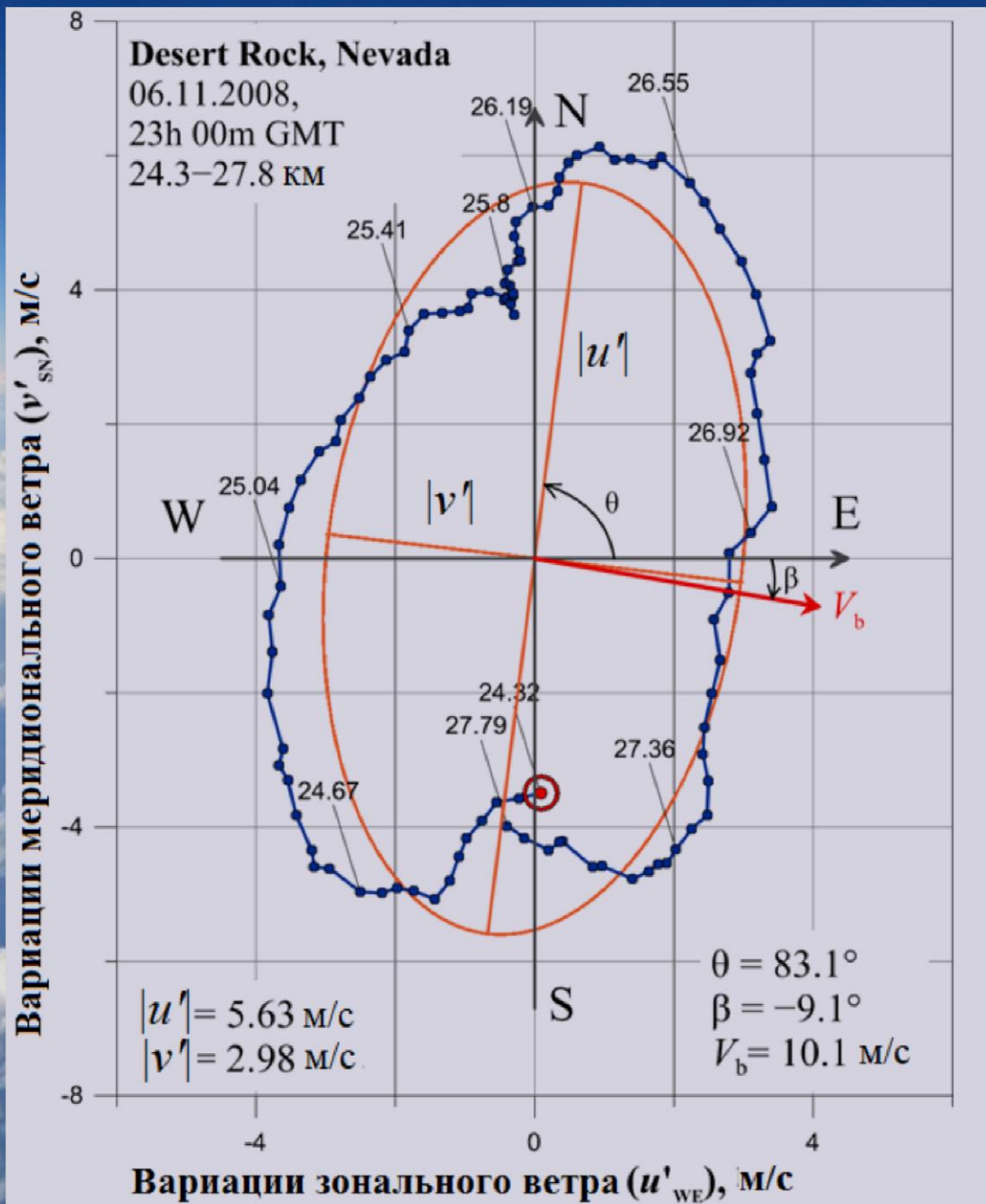


Рис. 4. Годограф вариаций скорости ветра, обусловленных внутренними волнами, для интервала высот **24.3 – 27.8 км** (точки – оригинальные данные, гладкая сплошная – эллипс МНК-аппроксимации данных, \odot – начальная точка годографа, числа вблизи точек указывают высоты). Стрелкой показано направление 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

- Fritts D.C., 1989. A review of gravity wave saturation processes, effects, and variability in the middle atmosphere // *Pure Appl. Geophys.* V.130. P. 343–371.
- Fritts D.C., Alexander M.J., 2003. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere // *Rev. Geophys.* V. 41. № 1. 1003, doi:10.1029/2001RG000106.
- Gubenko V.N., Andreev V.E., Pavelyev A.G., 2008a. Detection of layering in the upper cloud layer of Venus northern polar atmosphere observed from radio occultation data // *J. Geophys. Res.* V. 113. No. E03001, doi: 10.1029/2007JE002940.
- Gubenko V.N., Pavelyev A.G., Andreev V.E., 2008b. Determination of the intrinsic frequency and other wave parameters from a single vertical temperature or density profile measurement // *J. Geophys. Res.* V. 113. № D08109, doi:10.1029/2007JD008920.
- Gubenko V.N., Pavelyev A.G., Salimzyanov R.R., Pavelyev A.A., 2011. Reconstruction of internal gravity wave parameters from radio occultation retrievals of vertical temperature profiles in the Earth's atmosphere // *Atmos. Meas. Tech.* V. 4. № 10. P. 2153–2162, doi:10.5194/amt-4-2153-2011.
- Gubenko V.N., Pavelyev A.G., Salimzyanov R.R., Andreev V.E., 2012. A method for determination of internal gravity wave parameters from a vertical temperature or density profile measurement in the Earth's atmosphere // *Cosmic Res.* V. 50. No. 1. P. 21–31, doi: 10.1134/S0010952512010029.
- Gubenko V.N., Kirillovich I.A., Pavelyev A.G., 2015. Characteristics of internal waves in the Martian atmosphere obtained on the basis of an analysis of vertical temperature profiles of the Mars Global Surveyor mission // *Cosmic Res.* V. 53, No. 2. P. 133–142, doi: 10.1134/S0010952515020021.
- Pfister L., Chan K.R., Bui T.P. et al., 1993. Gravity waves generated by a tropical cyclone during the STEP tropical field program: A case study // *J. Geophys. Res.* V. 98. № D5. P. 8611 – 8638.
- Zink F., Vincent R.A., 2001. Wavelet analysis of stratospheric gravity wave packets over Macquarie Island, 1. Wave parameters // *J. Geophys. Res.* V. 106. № D10. P. 10275 – 10288.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!