

ДИАГНОСТИКА НАСЫЩЕНИЯ ВНУТРЕННИХ АТМОСФЕРНЫХ ВОЛН И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИХ ХАРАКТЕРИСТИК В СТРАТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ С ПОМОЩЬЮ РАДИОЗОНДОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

DIAGNOSTICS OF INTERNAL ATMOSPHERIC WAVE SATURATION AND DETERMINATION OF THEIR CHARACTERISTICS IN EARTH'S STRATOSPHERE FROM RADIOSONDE MEASUREMENTS

В.Н. Губенко

*Институт радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН,
Фрязино, Россия, vngubenko@gmail.com*

И.А. Кириллович

*Институт радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН,
Фрязино, Россия, sabersecretmail@gmail.com*

V.N. Gubenko

*Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS,
Fryazino, Russia, vngubenko@gmail.com*

I.A. Kirillovich

*Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS,
Fryazino, Russia, sabersecretmail@gmail.com*

Аннотация. Внутренние гравитационные волны (ВГВ) в значительной степени определяют структуру и циркуляцию атмосферы Земли путем переноса волновой энергии и импульса из нижних слоев в верхние. Поскольку внутренние волны могут свободно распространяться в устойчиво стратифицированной атмосфере, то аналогичные эффекты можно ожидать в атмосферах Марса и Венеры. Наблюдения флуктуаций температуры и скорости ветра, обусловленных внутренними волнами в 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 ВГВ объясняет такое замедление темпа роста амплитуды следующим образом: если волновая амплитуда превышает пороговую величину, это приводит к неустойчивости и возникновению турбулентности, которая препятствует дальнейшему увеличению амплитуды (насыщение внутренних волн). Полагают, что динамическая (сдвиговая) и конвективная неустойчивости являются теми механизмами, которые вносят наибольший вклад в диссипацию энергии и насыщение ВГВ в атмосфере. Предположение о насыщении внутренних волн играет ключевую роль при радиозатменном мониторинге ВГВ в атмосферах планет, поэтому изучение с помощью зондов процессов насыщения волн в атмосфере Земли является актуальной и важной задачей. Результаты определения реальных и пороговых амплитуд, степени насыщения и других характеристик для идентифицированных ВГВ в атмосфере Земли, полученные из анализа радиозондовых измерений скорости ветра и температуры SPARC (Stratospheric Processes And their Role in Climate) [<http://www.sparc.sunysb.edu/>], представлены в этой работе.

Ключевые слова: атмосфера Земли, внутренние гравитационные волны, насыщение, радиозондовые измерения, скорость ветра, температура.

Abstract. Internal gravity waves (IGW) significantly affect the structure and circulation of Earth's atmosphere by transporting wave energy and momentum upward from the lower atmosphere. Since IGW can propagate freely through a stably stratified atmosphere, similar effects may occur in the atmospheres of Mars and Venus. Observations of temperature and wind speed fluctuations induced by internal waves in Earth's atmosphere have shown that wave amplitudes increase with height, but not quickly enough to correspond to the amplitude increase due to an exponential decrease in the density without energy dissipation. The linear theory of IGW explains the wave amplitude growth rate as follows: any wave amplitude exceeding the threshold value leads to instability and produces turbulence, which hinders further amplitude growth (internal wave saturation). The mechanisms that contribute most to the energy dissipation and saturation of IGW in the atmosphere are thought to be the dynamical (shear) and convective instabilities. The assumption of internal wave saturation plays a key role in radio occultation (RO) monitoring of IGW in planetary atmospheres. A radiosonde study of wave saturation processes in Earth's atmosphere is therefore actual and important task. We report the results of determination of actual and threshold amplitudes, saturation degree, and other characteristics for the identified IGW in Earth's atmosphere obtained from the analysis of SPARC (Stratospheric Processes And their Role in Climate) radiosonde measurements of wind speed and temperature [<http://www.sparc.sunysb.edu/>].

Keywords: Earth's atmosphere, internal gravity waves, saturation, radiosonde measurements, wind speed, temperature.

ВВЕДЕНИЕ

Фундаментальной задачей физики атмосфер планет является исследование волновых процессов, которые, как показывают результаты наблюдений, определяют атмосферную динамику на всех высотах [Губенко и др., 2012]. Важная роль внутренних гравитационных волн (ВГВ), в первую очередь, 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 слои E_s представляют собой ионосферное проявление волн в преимущественно нейтральной атмосфере [Госсард, Хук, 1978; Gubenko et al., 2018]. Источниками генерации ВГВ в атмосфере могут быть тепловые контрасты вблизи поверхности, топография, сдвиговая неустойчивость ветра, конвекция и фронтальные процессы. В атмосфере Земли в отсутствие диссипации энергии амплитуда волновых возмущений скорости ветра или температуры растет примерно экспоненциально с увеличением высоты и поэтому возмущения с малой амплитудой вблизи поверхности могут производить значительные эффекты на больших высотах, где происходит обрушение волн и передача энергии и импульса ВГВ в невозмущенный поток. Поскольку ВГВ являются характерной особенностью устойчиво стратифицированной атмосферы, аналогичные эффекты можно ожидать в атмосферах Венеры и Марса. Полагают, что на Марсе внутренние атмосферные волны могут играть более важную роль, чем на Земле, так как во многих случаях амплитуды ВГВ в атмосфере Марса оказываются существенно больше своих земных аналогов [Creasey et al., 2006; Gubenko et al., 2008a; Губенко и др., 2012, 2015, 2016a].

Зондирование внутренних волн любыми способами сталкивается с проблемой, суть которой в том, что измеряемыми являются параметры возмущенного состояния атмосферы, например скорость ветра, температура или плотность, и по этому измерению необходимо определить, какая часть сигнала обусловлена ВГВ. Общий подход здесь заключается в том, чтобы отделить мелкомасштабные вариации от медленных изменений невозмущенного состояния и считать эти вариации связанными с волновыми проявлениями. Так, если измерения представляют собой временные реализации для фиксированного места наблюдений, например, как в случае измерений, выполняемых с помощью лидаров или радаров, указанное выше разделение масштабов можно осуществить в результате частотного анализа. Однако при этом необходимо учитывать, что не все анализируемые мелкомасштабные вариации обусловлены ВГВ. Наблюдаемые вариации могут быть связаны не только с внутренними волнами, но также с влиянием регулярных тонких слоев или турбулентности в атмосфере планеты. Корректная интерпретация

результатов исследования ВГВ предполагает наличие дискриминационного критерия идентификации волновых событий. Только в том случае, когда данный критерий удовлетворяется, анализируемые вариации могут рассматриваться как волновые проявления в атмосфере планеты [Gubenko et al., 2008b, 2011; Губенко и др., 2012, 2015, 2016a, b, c].

Спутниковые наблюдения в атмосфере радиозатменным методом являются мощным средством радиофизических исследований активности ВГВ по всей планете с почти однородным и высоким качеством экспериментальных данных [Gorbulov, Gurvich, 1998]. Анализ вертикальных профилей вариаций температуры, определяемых из радиозатменных экспериментов, дал возможность найти некоторые статистические характеристики (потенциальную энергию ВГВ на единицу массы) внутренних волн в атмосфере Земли [Steiner, Kirchengast, 2000; Tsuda et al., 2000; Tsuda, Hocke, 2002]. Преимуществом радиозатменных измерений с целью изучения внутренних атмосферных волн является широкий географический и временной охват исследуемых районов, позволяющий проводить глобальный мониторинг волновой активности в атмосфере планеты [Gavrilov et al., 2004; Гаврилов, Мануйлова, 2016]. Этот метод дает возможность получать в глобальном масштабе вертикальные профили атмосферных параметров (давления, плотности и температуры) с высоким вертикальным разрешением при любых погодных условиях [Liou et al., 2003, 2004; Paveleyev et al., 2009, 2012, 2015]. Однако до недавнего времени исследователи полагали, что восстанавливаемых вертикальных профилей температуры и плотности в радиозатменных экспериментах недостаточно для количественного описания волновых эффектов в атмосфере планеты [Губенко и др., 2012, 2015].

В этой связи мы разработали оригинальный метод идентификации дискретных волновых событий и реконструкции параметров ВГВ по результатам анализа индивидуальных вертикальных профилей температуры, плотности или квадрата частоты Брента—Вяйсяля в атмосфере планеты [Gubenko et al., 2008b, 2011; Губенко и др., 2012, 2015]. Метод не требует какой-либо дополнительной информации, не содержащейся в профиле, и может быть использован для анализа вертикальных профилей, полученных любыми способами. Сформулирован и обоснован пороговый критерий идентификации волновых событий, при выполнении которого анализируемые вариации могут рассматриваться как волновые проявления [Gubenko et al., 2008b, 2011; Губенко и др., 2012, 2015, 2016b]. Метод базируется на анализе относительной волновой амплитуды, а также на положении линейной теории ВГВ, согласно которому волновая амплитуда ограничена пороговой величиной динамической (сдвиговой) неустойчивости в атмосфере. Предполагается, что, когда амплитуда внутренней волны достигает порога сдвиговой неустойчивости по мере распространения волны вверх, диссипация волновой энергии происходит таким образом, что амплитуда ВГВ поддерживается

на уровне указанного порога (насыщение волновой амплитуды). Для апробации и проверки разработанного метода мы использовали данные одновременных зондовых измерений температуры и скорости ветра в стратосфере Земли [Cot, Barat, 1986]. С помощью анализа годографа скорости ветра авторы этой работы идентифицировали насыщенную ВГВ и определили ее характеристики. Использование зондовых измерений температуры и разработанного нами метода позволило независимым способом реконструировать все характеристики идентифицированной внутренней волны с погрешностями, не превышающими 30 % [Gubenko et al., 2008b; Губенко и др., 2012]. 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., 2008b, 2011; Губенко и др., 2015, 2016a, b, c]. Результаты мониторинга волновой активности могут быть полезными при построении численных моделей циркуляции атмосферы, включающих параметризацию волновых эффектов. Экспериментальное определение и анализ географических и сезонных распределений характеристик внутренних волн [Губенко и др., 2012, 2015, 2016b] являются необходимыми и важными этапами при построении адекватных моделей общей циркуляции атмосферы Земли. Разработанный нами оригинальный метод идентификации волновых событий и реконструкции характеристик ВГВ в атмосферах планет [Gubenko et al., 2008b, 2011; Губенко и др., 2012, 2015, 2016a, b, c] получил широкое признание научного сообщества как в России, так и за рубежом и в настоящее время успешно применяется при исследовании волновых процессов в атмосфере Земли [Horinouchi, Tsuda, 2009; Xiao, Hu, 2010; Rechou et al., 2014; Sacha et al., 2014; Noersomadi, Tsuda, 2017; Zagar et al., 2017] и Венеры [Altieri et al., 2014; Peralta et al., 2015]. В частности, исследователи из Франции и Швеции в своей работе [Rechou et al., 2014] показали, что данные численного моделирования и анализ независимых радарных и зондовых измерений в атмосфере Земли демонстрируют высокую эффективность разработанного нами метода и хорошую надежность получаемых на его основе научных результатов.

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. Одновременные данные о скорости ветра и температуре, полученные в ходе проведения радио-

зондовых измерений, позволяют больше внимания уделить роли, которую играют внутренние волны в атмосферной динамике. В некоторых отношениях зондовые данные обеспечивают проверку радиозатменных волновых исследований, которые используют анализ обусловленных внутренними волнами вариаций температуры или плотности в предположении насыщения амплитуды волнового поля (разработанный нами SWA-метод (saturated wave assumption)). Изменяя одновременно возмущения температуры и скорости ветра и анализируя их, можно оценить степень насыщения ВГВ без каких-либо предположений, проверить обоснованность и корректность предположения о насыщении внутренних волн и, следовательно, определить эффективность разработанного SWA-метода. Знание реальных и пороговых волновых амплитуд необходимо при оценке воздействия внутренних волн на невозмущенную атмосферу. Поскольку 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, c], радиозондовые исследования процессов насыщения в атмосфере Земли являются актуальными и важными. Для радиозондовых исследований ВГВ будет применен классический метод анализа годографа скорости ветра. Предлагаемый в данной работе усовершенствованный метод годографа основан на комбинированном анализе одновременных измерений скорости ветра и температуры, в котором используется поляризационное соотношение между волновыми вариациями скорости и температуры с целью достижения минимальных погрешностей в результатах реконструкции характеристик внутренних атмосферных волн.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ И МЕТОД ГОДОГРАФА

Дисперсионное уравнение связывает собственную частоту волны ω (частота, определяемая в системе отсчета, которая движется со скоростью невозмущенного ветра) с пространственными характеристиками ВГВ (горизонтальным k_h и вертикальным m волновыми числами) и с параметром стабильности невозмущенной атмосферной стратификации N_b (частота плавучести, или Брента — Вайсяля). Если для внутренних волн выполняются условия гидростатического режима: $N_b^2 \gg \omega^2 > f^2$, $m^2 \gg k_h^2$ и $m^2 \gg (2H)^{-2}$, дисперсионное уравнение имеет вид [Fritts, Alexander, 2003; Gubenko et al., 2008b, 2011; Губенко и др., 2012]:

$$(c - \bar{u})^2 = \frac{\omega^2}{k_h^2} = \frac{N_b^2}{m^2} \frac{1}{1 - f^2 / \omega^2}, \quad (1)$$

где $(c - \bar{u})$ — собственная горизонтальная фазовая скорость волны, c — горизонтальная фазовая скорость в системе отсчета земного наблюдателя (не-

подвижная система отсчета), \bar{u} — проекция невозмущенной скорости ветра на направление вектора \mathbf{k}_h и $H \simeq 7$ км — приведенная высота средней атмосферы Земли. Инерционная частота (параметр Кориолиса) f определяется выражением $f=2\Omega \sin\varphi$, где $\Omega=7.292 \cdot 10^{-5}$ рад/с — угловая скорость вращения Земли и φ — географическая широта. Вектор (k_h, m) определяет направление распространения фазы волны. Для внутренних волн, энергия которых переносится вверх (составляющая групповой скорости направлена вверх), фаза распространяется вниз ($m<0$) и наоборот. Собственная частота считается положительно определенной величиной ($\omega>0$).

Если ось системы координат выбрана в направлении горизонтальной составляющей \mathbf{k}_h волнового вектора, поляризационные соотношения приобретают простой вид [Zink, Vincent, 2001; Gubenko et al., 2008b, 2011; Губенко и др., 2012]:

$$v' = -i \frac{f}{\omega} u', \quad (2)$$

$$w' = -\frac{k_h}{m} u', \quad (3)$$

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

где u' и v' — комплексные возмущения компонент скорости ветра, направленных параллельно и перпендикулярно горизонтальной составляющей волнового вектора соответственно; 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. Комплексное и реальное физические возмущения связаны между собой простыми соотношениями. Так, комплексному возмущению u' соответствует реальное возмущение $\text{Re } u'$, а его амплитуда равна модулю $|u'|$ комплексного возмущения [Gubenko et al., 2008b; Губенко и др., 2012]. Из уравнения (2) следует, что разность фаз между возмущениями скорости u' и v' равна 90° , а отношение амплитуд $|v'|/|u'|$ равно f/ω . Поскольку годограф горизонтальной скорости ветра описывает эллипс и движение происходит в плоскости, перпендикулярной волновому вектору [Гилл, 1986], ВГВ на низких частотах при $\omega \sim f$ является эллиптически поляризованной поперечной волной. На более высоких частотах, когда справедливо неравенство $f/\omega \ll 1$, эллипс вырождается в прямую линию и внутренние волны становятся линейно поляризованными. Отметим, что поляризационное соотношение (4) выполняется для внутренних волн, энергия которых переносится вверх ($m<0$), в противном случае ($m>0$) необходимо в правой части уравнения (4) поменять знак плюс на минус [Pfister et al., 1993]. Дисперсионное уравнение (1) и поляризационные соотношения (2)–(4) являются приближениями, которым соответствуют два интервала гидростатического

волнового режима. Интервал промежуточных собственных частот определяется как область частот ω , для которых $N_b^2 \gg \omega^2 \gg f^2$. Здесь дисперсионное уравнение (1) сильно упрощается и дает простую связь собственной горизонтальной фазовой скорости $(c-\bar{u})$ с вертикальным волновым числом m и частотой Брента — Вайсяля: $|c-\bar{u}| = \omega/|k_h| = N_b/|m|$ [Fritts, Alexander, 2003; Губенко и др., 2012]. Интервал низких собственных частот определяется как область частот, для которых ω^2 имеет тот же порядок, что и f^2 , но $\omega^2 > f^2$.

Для вычисления частоты плавучести N_b по данным измерений вертикального профиля температуры $T_b(z)$ мы использовали следующее выражение [Gubenko et al., 2008b, 2011; Губенко и др., 2012]:

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

где g — ускорение свободного падения, $g/c_p=9.8 \cdot 10^{-3}$ К/м — адиабатический градиент температуры, T_b — невозмущенная (средняя) абсолютная температура, z — локальная вертикальная координата.

Идея анализа годографа состоит в отслеживании движения (вращения) вектора возмущений скорости ветра с высотой [Hines, 1988]. Согласно теории, волновой годограф (траектория, которую описывает конец вектора возмущений скорости) имеет форму эллипса, большая ось которого параллельна направлению горизонтального распространения волны, а длины большой и малой полуосей эллипса представляют амплитуды возмущений скорости ветра вдоль вектора \mathbf{k}_h и в поперечном направлении соответственно. Собственная частота волны ω может быть определена из выражения для аксиального отношения AXR , в котором учтено влияние вертикального сдвига поперечной компоненты средней скорости V_T ветра [Hines, 1988]:

$$AXR = \frac{|v'|}{|u'|} = \left| \frac{f}{\omega} - \frac{1}{N_b} \frac{dV_T}{dz} \right|, \quad (6)$$

где $|u'|$ и $|v'|$ — длины большой и малой полуосей эллипса соответственно. Таким образом, определяя из эксперимента величины N_b , f/ω , ω и $|m|=2\pi/\lambda_z$ (λ_z — вертикальная длина волны) и учитывая дисперсионное уравнение (1), можно найти значение $|k_h|$, горизонтальную длину волны $\lambda_h=2\pi/|k_h|$ и собственную горизонтальную фазовую скорость $|c-\bar{u}|$.

Амплитуда вертикальных возмущений скорости $|w'|$ определяется из поляризационного соотношения (3).

Для исследования процессов насыщения ВГВ на основе найденного отношения f/ω мы вычислили относительную пороговую амплитуду a сдвиговой неустойчивости [Fritts, 1989]:

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

где $|u'_{\text{sat}}|$ — амплитуда насыщения горизонтальных возмущений скорости ветра, направленных парал-

тельно вектору \mathbf{k}_h . По результатам анализа конкретного сеанса радиозондовых измерений мы имеем две независимые оценки относительной волновой амплитуды a_e и a_u [Gubenko et al., 2011]:

$$a_e = \frac{|u'|}{|c - \bar{u}|} = \frac{g|m|}{N_b^2} |\hat{T}'| = \frac{2\pi g}{\lambda_z N_b^2} |\hat{T}'|,$$

$$a_u = \frac{|u'|}{|c - \bar{u}|} = \frac{|u'| |m|}{N_b} \sqrt{1 - \frac{f^2}{\omega^2}}. \quad (8)$$

Величина a_e вычисляется на основе анализа только температурных данных, в то время как при определении a_u используются измерения как скорости, так и температуры. Степень насыщения ВГВ определяется нами как отношение амплитуды возмущений скорости $|u'|$ к величине волновой амплитуды насыщения $|u'_{\text{sat}}|$, и ее можно найти из выражений (8) двумя разными способами [Gubenko et al., 2011]:

$$d_e = \frac{|u'|}{|u'_{\text{sat}}|} = \frac{a_e}{a},$$

$$d_u = \frac{|u'|}{|u'_{\text{sat}}|} = \frac{a_u}{a}. \quad (9)$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для демонстрации возможностей изложенного 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 6 с, 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.

На рис. 1 представлены два профиля температуры, полученные по измерениям в атмосфере Земли над пустынным районом Desert Rock, которые проводились с интервалом ~12 ч. Высотная корреляция квазипериодических вариаций температуры для указанных профилей в выделенном интервале предполагает, что эти вариации могут быть обусловлены ВГВ или полусуточным тепловым приливом с периодом ~12 ч в системе отсчета земного наблюдателя. Для проверки данного предположения мы провели совместный анализ данных о температуре (рис. 1, слева), зональной и меридиональной скорости ветра (рис. 1, справа) для сеанса измерений 06.11.2008. Зональным принято направление с запада на восток, меридиональным — с юга на север.

На рис. 2 показаны анализируемые профили для выделенного нами интервала 22.5–30 км волновых проявлений. Пунктиром показаны соответствующие средние (невозмущенные) профили, вычисленные на основе аппроксимации исходных данных полиномом 3-й степени методом наименьших квадратов (МНК). Применяв выражение (5) к среднему про-

филю температуры, мы получили оценку частоты Брента — Вэйсяля N_b (параметр стабильности атмосферной стратификации) для анализируемого интервала $N_b \simeq 2.18 \cdot 10^{-2}$ рад/с.

На рис. 3 показаны высотные профили вариаций температуры и составляющих скорости, которые определялись как разность исходных и соответствующих средних профилей на рис. 2. По ним мы определили амплитуду вариаций температуры $|T'| \simeq 2.74$ К и вертикальную длину волны $\lambda_z \simeq 3.4$ км возмущений скорости и температуры. Также был выбран интервал для построения годографа и определено значение T_b средней температуры $T_b \simeq 218$ К в центре указанного интервала на высоте 26 км.

На рис. 4 представлен годограф горизонтальных вариаций скорости ветра для интервала высот 24.3–27.8 км. Абсцисса и ордината показывают значения зональной и меридиональной компонент соответственно. Здесь точки — оригинальные данные, \odot — начальная точка годографа, числа вблизи экспериментальных точек указывают высоту в километрах. Стрелкой показано направление средней скорости ветра \mathbf{V}_b на высоте 26 км. Там же гладкой сплошной линией показан эллипс МНК-аппроксимации анализируемых данных, длины большой и малой полуосей которого определяют амплитуды $|u'|$ и $|v'|$ горизонтальных возмущений скорости: $|u'| \simeq 5.63$ м/с и $|v'| \simeq 2.98$ м/с. Согласно теории ВГВ, вращение конца вектора вариаций скорости по часовой стрелке с увеличением высоты в Северном полушарии соответствует распространению фазы вниз и переносу волновой энергии вверх.

Мы вычислили значение параметра Кориолиса $f \simeq 0.86 \cdot 10^{-4}$ рад/с в пункте наблюдений и, используя (6), нашли отношение f/ω и собственную частоту ω : $f/\omega \simeq 0.53$ и $\omega \simeq 1.63 \cdot 10^{-4}$ рад/с (собственный период волны равен $T^{\text{in}} = 2\pi/\omega \simeq 10.7$ ч). Далее с помощью уравнения (1) была определена величина собственной горизонтальной фазовой скорости $|c - \bar{u}| \simeq 13.9$ м/с и вычислена горизонтальная длина волны $\lambda_h = |c - \bar{u}| T^{\text{in}} \simeq 535$ км. Учитывая соотношение (3), была найдена амплитуда вертикальных возмущений скорости ветра $|w'| \simeq 3.6 \cdot 10^{-2}$ м/с. Используя известное соотношение между собственной частотой ω и частотой волны σ в системе отсчета земного наблюдателя $\sigma = \omega + \mathbf{k}_h \mathbf{V}_b$, мы определили частоту σ . Зная направление большой оси эллипса годографа, можно найти направление горизонтального волнового вектора \mathbf{k}_h с неопределенностью 180°. Угол между векторами \mathbf{k}_h и \mathbf{V}_b (рис. 4) близок к прямому углу (92.2° или 87.8°), поэтому $\mathbf{k}_h \mathbf{V}_b \simeq 0$ и $\sigma \simeq \omega \simeq 1.63 \cdot 10^{-4}$ рад/с. Период волны в неподвижной системе отсчета $T^{\text{ob}} = 2\pi/\sigma \simeq 10.7$ ч совпадает с собственным периодом T^{in} , его значение близко к обсуждаемой ранее величине ~12 ч. Это подтверждает гипотезу, что наблюдаемые квазипериодические вариации (рис. 1) обусловлены ВГВ, а не полусуточным тепловым приливом.

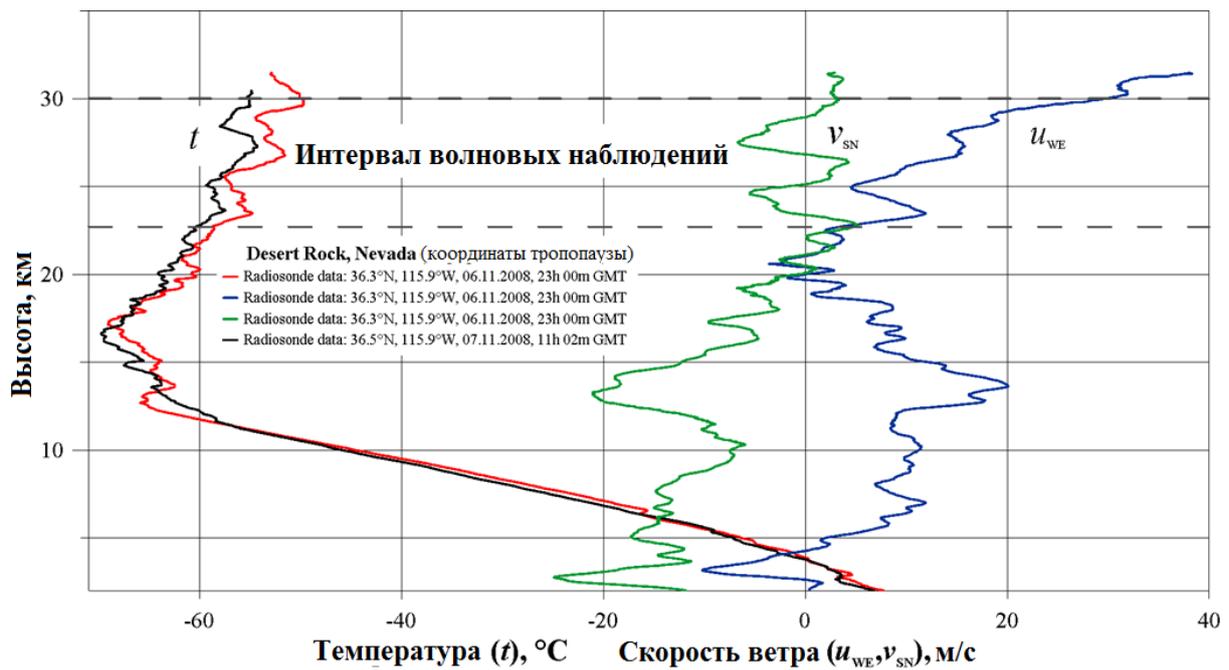


Рис. 1. Вертикальные профили температуры t , зональной u_{WE} и меридиональной v_{SN} скорости ветра, найденные из радиозондовых измерений в атмосфере над пустынным районом Desert Rock, Nevada

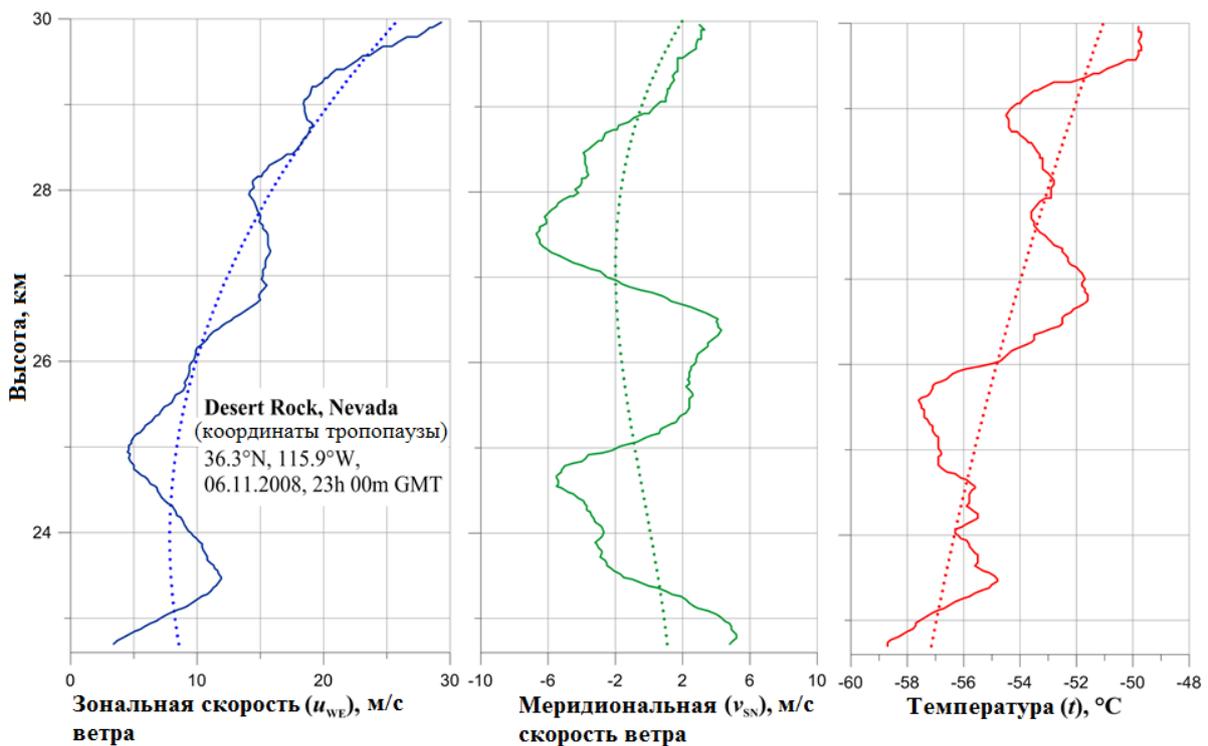


Рис. 2. Высотные профили температуры, зональной и меридиональной компонент скорости ветра, полученные из зондовых измерений 06.11.2008 в атмосфере над районом Desert Rock

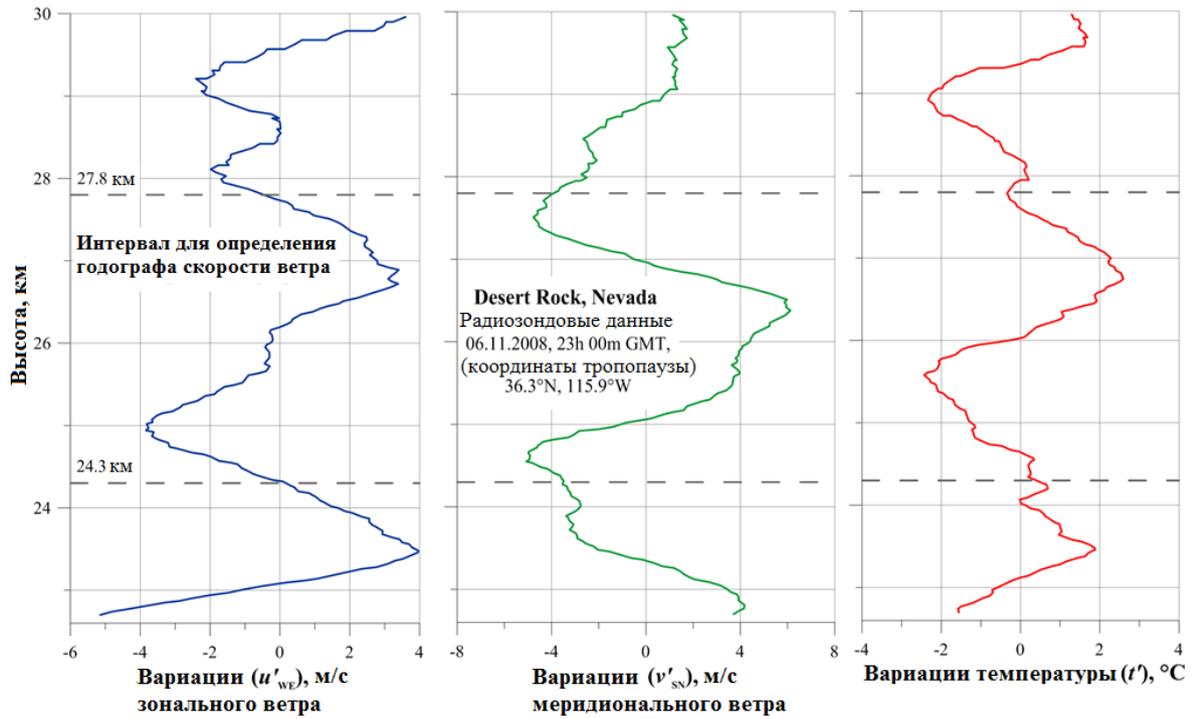


Рис. 3. Высотные профили вариаций температуры и составляющих скорости ветра, найденные из радиозондовых измерений 06.11.2008 в атмосфере над районом Desert Rock

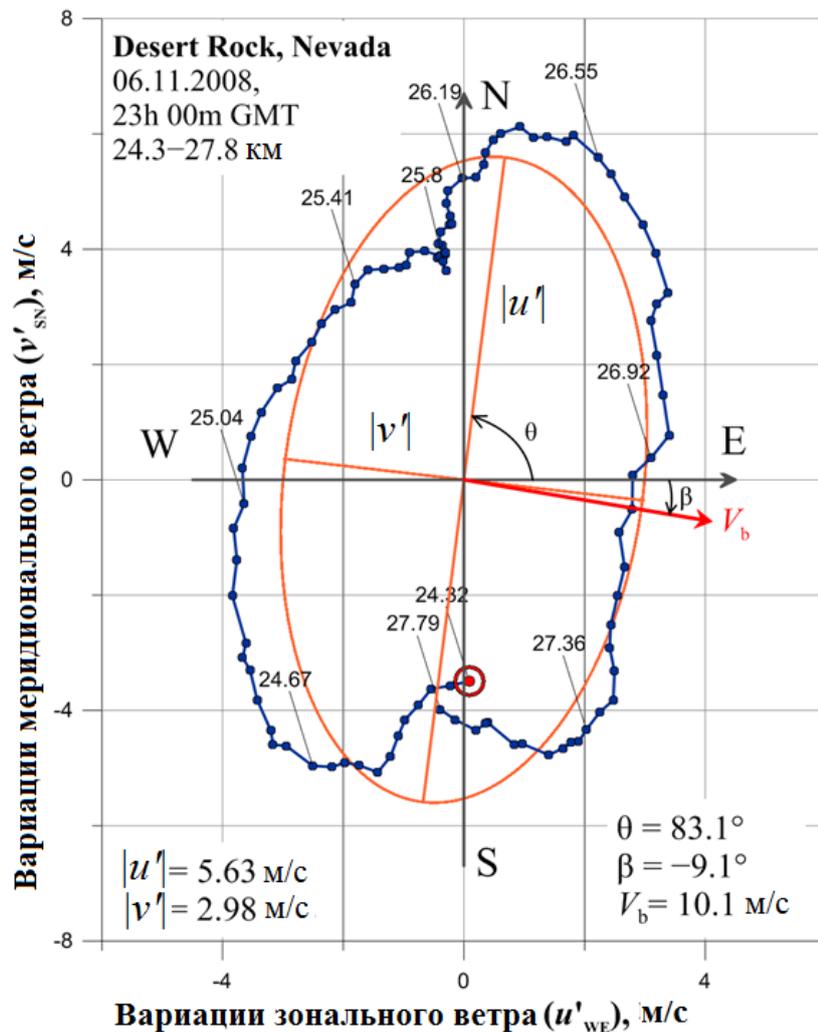


Рис. 4. Годограф вариаций скорости ветра, построенный для интервала высот 24.3–27.8 км

Внутренние волны будут только тогда воздействовать на невозмущенный ветер или приводить к перемешиванию составляющих в атмосфере, когда возникает волновая диссипация энергии. Полагают, что динамическая и конвективная неустойчивости являются основными процессами, приводящими к диссипации [Fritts, 1989; Fritts, Alexander, 2003], однако имеют место и другие механизмы (молекулярная диффузия, радиационный демпинг, нелинейные взаимодействия). Конвективная или динамическая неустойчивость приводит к обрушению ВГВ, когда ее амплитуда превышает определенный порог. С помощью выражения (7) мы вычислили пороговую амплитуду $a \approx 0.92$ для сдвиговой неустойчивости, которая является определяющей для низкочастотных ВГВ с $\omega \sim f$ [Fritts, 1989]. Из-за существования пороговых амплитуд механизмы насыщения становятся нелинейными, поэтому важно знать величины реальных волновых амплитуд в экспериментах. Используя выражения (8), мы получили две независимые оценки волновой амплитуды $a_c \approx 0.43$ и $a_u \approx 0.40$, которые хорошо согласуются между собой. Это указывает на высокое качество анализируемых данных по температуре и скорости ветра, а также свидетельствует, что поляризационное соотношение (4) удовлетворяется. Из выражений (9) двумя разными способами были найдены оценки степени насыщения ВГВ $d_c \approx 0.47 = 47\%$ и $d_u \approx 0.44 = 44\%$.

Проведенный анализ свидетельствует о том, что предлагаемый метод позволяет надежно идентифицировать следы ВГВ в данных радиозондовых измерений, а также определять характеристики и степень насыщения внутренних волн в атмосфере Земли без привлечения каких-либо предположений. При радиозатменном мониторинге волновой активности в атмосферах планет [Gubenko et al., 2008b, 2011; Губенко и др., 2012, 2015] используется предположение о насыщении волновой амплитуды. Полученные результаты показывают, что положение о насыщении ВГВ выполняется не всегда, что может приводить к систематическим погрешностям и смещению восстанавливаемых волновых характеристик. В частности, оценки собственной частоты могут систематически занижаться, а значения горизонтальной длины волны — завышаться.

Работа выполнена при частичной поддержке Программы 28 Президиума Российской академии наук. Авторы выражают благодарность двум анонимным рецензентам статьи за содержательные и конструктивные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гаврилов Н.М., Мануйлова Р.О. Многолетние глобальные распределения мезомасштабных вариаций радиорефракции атмосферы по данным GPS спутника CHAMP // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2016. Т. 59, № 7. С. 593–604.
- Гилл А. Динамика атмосферы и океана. М.: Мир. 1986. Т. 1. 397 с.
- Госсард Э.Э., Хук У.Х. Волны в атмосфере. М.: Мир, 1978. 532 с.

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 // Косм. иссл. 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 // Косм. иссл. 2015. Т. 53, № 2. С. 141–151. DOI: [10.7868/S0023420615020028](https://doi.org/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 // Изв. 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 // Изв. ВУЗов. Физика. 2016б. Т. 59, № 12-3. С. 80–85.

Губенко В.Н., Павельев А.Г., Андреев В.Е. и др. Радиозатменные исследования внутренних волн и слоистых структур в атмосферах Земли, Марса и Венеры // Современные достижения в плазменной гелиогеофизике. 2016с. М.: ИКИ РАН, 2016. С. 548–554. URL: <http://iki.cosmos.ru/books/2016petrukovich-2.pdf> (дата обращения: 31.03.2018).

Altieri F., Migliorini A., Zasova L., et al. Modeling VIRTIS/VEX O₂(a₁Δg) nightglow profiles affected by the propagation of gravity waves in the Venus upper mesosphere // J. Geophys. Res. 2014. V. 119. P. 2300–2316. DOI: [10.1002/2013JE004585](https://doi.org/10.1002/2013JE004585).

Cot C., Barat J. Wave-turbulence interaction in the stratosphere: A case study // J. Geophys. Res. 1986. V. 91, D2. P. 2749–2756.

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. V. 33, L01803. DOI: [10.1029/2005GL024037](https://doi.org/10.1029/2005GL024037).

Fritts D.C. A review of gravity wave saturation processes, effects, and variability in the middle atmosphere // Pure Appl. Geophys. 1989. V. 130. P. 343–371.

Fritts D.C., Alexander M.J. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere // Rev. Geophys. 2003. V. 41, N 1. P. 1–59. DOI: [10.1029/2001RG000106](https://doi.org/10.1029/2001RG000106).

Gavrilov N.M., Karpova N.V., Jacobi Ch., Gavrilov A.N. Morphology of atmospheric refraction index variations at different altitudes from GPS/MET satellite observations // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2004. V. 66, N 6–9. P. 427–435.

Gorbunov M.E., Gurvich A.S. Microlab-1 experiment: Multipath effects in the lower troposphere // J. Geophys. Res. 1998. V. 103, D12. P. 13819–13826.

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. 2008a. V. 113, E03001. DOI: [10.1029/2007JE002940](https://doi.org/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 // J. Geophys. Res. 2008b. V. 113, D08109. DOI: [10.1029/2007JD008920](https://doi.org/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 // Atmos. Meas. Tech. 2011. V. 4, N 10. P. 2153–2162. DOI: [10.5194/amt-4-2153-2011](https://doi.org/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 //

Adv. Space Res. 2018. V. 61, N 7. P. 1702–1716. DOI: [10.1016/j.asr.2017.10.001](https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.10.001).

Hines C.O. Tropopausal mountain waves over Arecibo: A case study // J. Atmos. Sci. 1988. V. 46, N 4. P. 476–488.

Horinouchi T., Tsuda T. Spatial structures and statistics of atmospheric gravity waves derived using a heuristic vertical cross section extraction from COSMIC GPS radio occultation data // J. Geophys. Res. 2009. V. 114, D16110. DOI: [10.1029/2008JD011068](https://doi.org/10.1029/2008JD011068).

Liou Y.A., Pavelyev A.G., Huang C.Y., et al. Analytic method for observation of the gravity waves using radio occultation data // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30, N 20. CiteID 2021. DOI: [10.1029/2003GL017818](https://doi.org/10.1029/2003GL017818).

Liou Y.A., Pavelyev A.G., Wickert J. et al. Response of GPS occultation signals to atmospheric gravity waves and retrieval of gravity wave parameters // GPS Solutions. 2004. V. 8, N 2. P. 103–111.

Noersomadi N., Tsuda T. Comparison of three retrievals of COSMIC GPS radio occultation results in the tropical upper troposphere and lower stratosphere // Earth, Planets and Space. 2017. V. 69:125. DOI: [10.1186/s40623-017-0710-7](https://doi.org/10.1186/s40623-017-0710-7).

Pavelyev A.G., Liou Y.A., Wickert J., et al. 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](https://doi.org/10.1007/978-3-642-00321_9).

Pavelyev A.G., Liou Y.A., Zhang K., et al. Identification and localization of layers in the ionosphere using the eikonal and amplitude of radio occultation signals // Atmos. Meas. Tech. 2012. V. 5, N 1. P. 1–16. DOI: [10.5194/amt-5-1-2012](https://doi.org/10.5194/amt-5-1-2012).

Pavelyev A.G., Liou Y.A., Matyugov S.S., et al. Application of the locality principle to radio occultation studies of the Earth's atmosphere and ionosphere // Atmos. Meas. Tech. 2015. V. 8, N 7. P. 2885–2899. DOI: [10.5194/amt-8-2885-2015](https://doi.org/10.5194/amt-8-2885-2015).

Peralta J., Sanchez-Lavega A., Lopez-Valverde M.A., et al. Venus's major cloud feature as an equatorially trapped wave distorted by the wind // Geophys. Res. Lett. 2015. V. 42. DOI: [10.1002/2014GL062280](https://doi.org/10.1002/2014GL062280).

Pfister L., Chan K.R., Bui T.P. et al. Gravity waves generated by a tropical cyclone during the STEP tropical field program: A case study // J. Geophys. Res. 1993. V. 98, D5. P. 8611–8638.

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 // Atmos. Chem. Phys. 2014. V. 14. P. 6785–6799. DOI: [10.5194/acp-14-6785-2014](https://doi.org/10.5194/acp-14-6785-2014).

Sacha P., Foelsche U., Pisoft P. Analysis of internal gravity waves with GPS RO density profiles // Atmos. Meas. Tech. 2014. V. 7. P. 4123–4132. DOI: [10.5194/amt-7-4123-2014](https://doi.org/10.5194/amt-7-4123-2014).

Steiner A.K., Kirchengast G. GW spectra from GPS/MET occultation observations // J. Atmos. Ocean. Tech. 2000. V. 17. P. 495–503.

Tsuda T., Hocke K. Vertical wave number spectrum of temperature fluctuations in the stratosphere using GPS occultation data // J. Meteorol. Soc. Jpn. 2002. V. 80, 4B. P. 1–13.

Tsuda T., Nishida M., Rocken C., Ware R.H. A global morphology of GW activity in the stratosphere revealed by the GPS occultation data (GPS/MET) // J. Geophys. Res. 2000. V. 105, D6. P. 7257–7273.

Xiao C.Y., Hu X. Analysis on the global morphology of stratospheric gravity wave activity deduced from the COSMIC GPS occultation profiles // GPS Solutions. 2010. V. 14. P. 65–74. DOI: [10.1007/s10291-009-0146-z](https://doi.org/10.1007/s10291-009-0146-z).

Zagar N., Jelic D., Blaauw M., Bechtold P. Energy spectra and inertia-gravity waves in global analyses // J. Atmosph. Sci. 2017. V. 74, N 8. P. 2447–2466. DOI: [10.1175/JAS-D-16-0341.1](https://doi.org/10.1175/JAS-D-16-0341.1).

Zink F., Vincent R.A. Wavelet analysis of stratospheric gravity wave packets over Macquarie Island. 1. Wave parameters // J. Geophys. Res. 2001. V. 106, D10. P. 10275–10288.

URL: <http://www.sparc.sunysb.edu/> (дата обращения 9 марта 2018 г.).

REFERENCES

Altieri F., Migliorini A., Zasova L., Shakun A., Piccioni G., Bellucci G. Modeling VIRTIS/VEX O2(a1Δg) nightglow profiles affected by the propagation of gravity waves in the Venus upper mesosphere. *J. Geophys. Res.* 2014, vol. 119, pp. 2300–2316. DOI: [10.1002/2013JE004585](https://doi.org/10.1002/2013JE004585).

Cot C., Barat J. Wave-turbulence interaction in the stratosphere: A case study. *J. Geophys. Res.* 1986, vol. 91, no. D2, pp. 2749–2756.

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, L01803. DOI: [10.1029/2005GL024037](https://doi.org/10.1029/2005GL024037).

Fritts D.C. A review of gravity wave saturation processes, effects, and variability in the middle atmosphere. *Pure Appl. Geophys.* 1989, vol. 130, pp. 343–371.

Fritts D.C., Alexander M.J. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere. *Rev. Geophys.* 2003, vol. 41, no. 1, pp. 1–59. DOI: [10.1029/2001RG000106](https://doi.org/10.1029/2001RG000106).

Gavrilov N.M., Karpova N.V., Jacobi Ch., Gavrilov A.N. Morphology of atmospheric refraction index variations at different altitudes from GPS/MET satellite observations. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2004, vol. 66, no. 6–9, pp. 427–435.

Gavrilov N.M., Manuilova R.O. Long-term global distributions of mesoscale variations in atmospheric radio refraction obtained from the GPS Champ Satellite Data. *Radiophysic and Quantum Electronics.* 2016, vol. 59, no. 7, pp. 535–545. DOI: [10.1007/s11141-016-9721-7](https://doi.org/10.1007/s11141-016-9721-7).

Gill A.E. *Dinamika atmosfery i okeana* [Atmosphere-Ocean Dynamics]. Moscow: Mir Publ., 1986, vol. 1. (In Russian). English Edition: Gill A.E. *Atmosphere-Ocean Dynamics*. New York, London, Paris: Academic Press, 1982.

Gorbunov M.E., Gurvich A.S. Microlab-1 experiment: Multipath effects in the lower troposphere. *J. Geophys. Res.* 1998, vol. 103, no. D12, pp. 13819–13826.

Gossard E.E., Hooke W.H. *Waves in the Atmosphere*. Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam–Oxford–New York, 1975.

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.* 2008a, vol. 113, E03001. DOI: [10.1029/2007JE002940](https://doi.org/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. *J. Geophys. Res.* 2008b, vol. 113, D08109. DOI: [10.1029/2007JD008920](https://doi.org/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. *Atmos. Meas. Tech.* 2011, vol. 4, no. 10, pp. 2153–2162. DOI: [10.5194/amt-4-2153-2011](https://doi.org/10.5194/amt-4-2153-2011).

Gubenko V.N., Pavelyev A.G., Salimzyanov R.R., Andreev V.E. A method for determination of internal gravity wave parameters from a vertical temperature or density profile measurement in the Earth's atmosphere. *Cosmic Res.* 2012, vol. 50, no. 1, pp. 21–31. DOI: [10.1134/S0010952512010029](https://doi.org/10.1134/S0010952512010029).

Gubenko V.N., Kirillovich I.A., Pavelyev A.G. 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.* 2015, vol. 53, no. 2, pp. 133–142. DOI: [10.1134/S0010952515020021](https://doi.org/10.1134/S0010952515020021).

Gubenko V.N., Kirillovich I.A., Pavelyev A.G., Andreev V.E. Detection of saturated internal gravity waves and reconstruction of their characteristics in the Martian atmosphere. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika* [Russian Physics Journal]. 2016a, vol. 59, no. 12-2, pp. 46–49. (In Russian).

Gubenko V.N., Kirillovich I.A., Liou Y.-A., Pavelyev A.G. Monitoring of internal gravity waves in the Arctic and Antarctic atmosphere. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika* [Russian Physics Journal]. 2016b, vol. 59, no. 12-3, pp. 80–85. (In Russian).

Gubenko V.N., Pavelyev A.G., Andreev V.E., Kirillovich I.A., Salimzyanov R.R. Radio occultation investigations of internal waves and layered structures in atmospheres of the Earth, Mars and Venus. *Sovremennye Dostizheniya v Plazmennoi Geliogeofizike* [Modern Achievements in Plasma Heliogeophysics]. 2016c. Moscow: IKI RAN Publ., 2016. pp. 548–554. (In Russian). URL: <http://iki.cosmos.ru/books/2016petrukovich-2.pdf> (accessed 31 March 2018).

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. *Adv. Space Res.* 2018, vol. 61, iss. 7, pp. 1702–1716. DOI: [10.1016/j.asr.2017.10.001](https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.10.001).

Hines C.O. Tropopause mountain waves over Arecibo: A case study. *J. Atmos. Sci.* 1988, vol. 46, no. 4, pp. 476–488.

Horinouchi T., Tsuda T. Spatial structures and statistics of atmospheric gravity waves derived using a heuristic vertical cross section extraction from COSMIC GPS radio occultation data. *J. Geophys. Res.* 2009, vol. 114, D16110. DOI: [10.1029/2008JD011068](https://doi.org/10.1029/2008JD011068).

Liou Y.A., Pavelyev A.G., Huang C.Y., Igarashi K., Hocke K., Yan S.K. Analytic method for observation of the gravity waves using radio occultation data. *Geophys. Res. Lett.* 2003, vol. 30, no. 20. CiteID 2021. DOI: [10.1029/2003GL017818](https://doi.org/10.1029/2003GL017818).

Liou Y.A., Pavelyev A.G., Wickert J., Huang C.Y., Yan S.K., Liu S.F. Response of GPS occultation signals to atmospheric gravity waves and retrieval of gravity wave parameters. *GPS Solutions*. 2004, vol. 8, no. 2, pp. 103–111.

Noersomadi N., Tsuda T. Comparison of three retrievals of COSMIC GPS radio occultation results in the tropical upper troposphere and lower stratosphere. *Earth, Planets and Space*. 2017, vol. 69:125. DOI: [10.1186/s40623-017-0710-7](https://doi.org/10.1186/s40623-017-0710-7).

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, pp. 165–178. DOI: [10.1007/978-3-642-00321-9](https://doi.org/10.1007/978-3-642-00321-9).

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. *Atmos. Meas. Tech.* 2012, vol. 5, no. 1, pp. 1–16. DOI: [10.5194/amt-5-1-2012](https://doi.org/10.5194/amt-5-1-2012).

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. *Atmos. Meas. Tech.* 2015, vol. 8, no. 7, pp. 2885–2899. DOI: [10.5194/amt-8-2885-2015](https://doi.org/10.5194/amt-8-2885-2015).

Peralta J., Sanchez-Lavega A., Lopez-Valverde M.A., Luz D., Machado P. Venus's major cloud feature as an equatorially trapped wave distorted by the wind. *Geophys. Res. Lett.* 2015, vol. 42. DOI: [10.1002/2014GL062280](https://doi.org/10.1002/2014GL062280).

Pfister L., Chan K.R., Bui T.P., Bowen S., Legg M., Gary B., Kelly K., Proffitt M., Starr W. Gravity waves generated by a tropical cyclone during the STEP tropical field program: A case study. *J. Geophys. Res.* 1993, vol. 98, no. D5, pp. 8611–8638.

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. *Atmos. Chem. Phys.* 2014, vol. 14, pp. 6785–6799. DOI: [10.5194/acp-14-6785-2014](https://doi.org/10.5194/acp-14-6785-2014).

Sacha P., Foelsche U., Pisoft P. Analysis of internal gravity waves with GPS RO density profiles. *Atmos. Meas. Tech.* 2014, vol. 7, pp. 4123–4132. DOI: [10.5194/amt-7-4123-2014](https://doi.org/10.5194/amt-7-4123-2014).

Steiner A.K., Kirchengast G. GW spectra from GPS/MET occultation observations. *J. Atmos. Ocean. Tech.* 2000, vol. 17, pp. 495–503.

Tsuda T., Hocke K. Vertical wave number spectrum of temperature fluctuations in the stratosphere using GPS occultation data. *J. Meteorol. Soc. Jpn.* 2002, vol. 80, no. 4B, pp. 1–13.

Tsuda T., Nishida M., Rocken C., Ware R.H. A global morphology of GW activity in the stratosphere revealed by the GPS occultation data (GPS/MET). *J. Geophys. Res.* 2000, vol. 105, no. D6, pp. 7257–7273.

Xiao C.Y., Hu X. Analysis on the global morphology of stratospheric gravity wave activity deduced from the COSMIC GPS occultation profiles. *GPS Solutions*. 2010, vol. 14, pp. 65–74. DOI: [10.1007/s10291-009-0146-z](https://doi.org/10.1007/s10291-009-0146-z).

Zagar N., Jelic D., Blaauw M., Bechtold P. Energy spectra and inertia-gravity waves in global analyses. *J. Atmosph. Sci.* 2017, vol. 74, no. 8, pp. 2447–2466. DOI: [10.1175/JAS-D-16-0341.1](https://doi.org/10.1175/JAS-D-16-0341.1).

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, pp. 10275–10288.

URL: <http://www.sparc.sunysb.edu/> (accessed 9 March 2018).

Как цитировать эту статью

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](https://doi.org/10.12737/szf-42201807).