

Развитие методов исследования внутренних гравитационных волн в атмосфере Земли с помощью радиозондовых измерений

В.Н. Губенко, И.А. Кириллович

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Московская область, 141190 Фрязино, пл. Введенского, дом 1, E-mail: gubenko@fireras.su,
vnubenko@gmail.com.

Внутренние гравитационные волны (ВГВ) определяют атмосферную динамику на всех высотах, обеспечивая эффективный механизм переноса волновой энергии и импульса из нижних слоев атмосферы в верхние. Динамическая (сдвиговая) и конвективная неустойчивости вносят наибольший вклад в диссипацию энергии и насыщение внутренних волн в атмосфере Земли. Гипотеза о насыщении волн является ключевым положением при радиозатменном мониторинге ВГВ в атмосферах планет, поэтому проверка его выполнения в атмосфере Земли с помощью радиозондовых исследований является важной задачей физики атмосферы. В работе предлагается вариант усовершенствованного метода годографа, который основан на комбинированном анализе одновременных измерений скорости ветра и температуры. Для достижения минимальных погрешностей в результатах реконструкции характеристик внутренних волн нами используется поляризационное соотношение между волновыми вариациями скорости ветра и температуры в атмосфере планеты. Показано, что модернизированный метод анализа годографа скорости ветра является особенно актуальным для случаев, когда собственные частоты ВГВ существенно превосходят значения параметра Кориолиса.

Internal gravity waves (IGWs) determine atmospheric dynamics at all heights providing an effective mechanism for the transfer of wave energy and momentum upward from the lower atmospheric layers. The dynamical (shear) and convective instabilities contribute most to the energy dissipation and saturation of internal waves in the Earth's atmosphere. The assumption of wave saturation is a key point in the radio occultation monitoring of IGWs for planetary atmospheres, therefore, verification of its implementation in the Earth's atmosphere using radiosonde studies is an important task of atmospheric physics. The work proposes a variant of the improved hodograph method which is based on a combined analysis of simultaneous measurements of wind speed and temperature. To achieve the minimal errors in results of reconstructing the internal wave characteristics, we use the polarization relation between wave variations of wind speed and temperature in the planetary atmosphere. It has been shown that the upgraded method of wind speed hodograph analysis is especially relevant for cases when the intrinsic frequencies of IGWs noticeably exceed the Coriolis parameter values.

Введение

Фундаментальной задачей физики атмосфер планет является исследование волновых процессов, которые, как показывают результаты наблюдений, определяют атмосферную динамику на всех высотах. 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 E-слои представляют собой ионосферное проявление волн в преимущественно нейтральной атмосфере [1, 2]. Источниками генерации ВГВ в атмосфере могут быть тепловые контрасты вблизи поверхности, топография, сдвиговая неустойчивость ветра, конвекция и фронтальные процессы. Поскольку внутренние волны являются характерной особенностью устойчиво стратифицированной атмосферы, аналогичные эффекты можно ожидать в атмосферах Венеры и Марса.

Спутниковые наблюдения в атмосфере Земли радиозатменным методом являются мощным средством радиофизических исследований активности внутренних волн по

всей планете с почти однородным и высоким качеством экспериментальных данных. Преимуществом радиозатменных измерений с целью изучения ВГВ является широкий географический и временной охват исследуемых районов, позволяющий проводить глобальный мониторинг волновой активности в атмосфере планеты. Этот метод дает возможность получать в глобальном масштабе вертикальные профили атмосферных параметров (давления, плотности и температуры) с высоким вертикальным разрешением при любых погодных условиях [3–5]. Ранее, предположение о волновом происхождении вариаций температуры, полученных из радиозатменных экспериментов, дало возможность определить плотность потенциальной энергии ВГВ на единицу массы в атмосфере Земли. Однако до недавнего времени исследователи считали, что восстанавливаемых в экспериментах вертикальных профилей температуры и плотности недостаточно для количественного описания волновых эффектов в атмосфере.

В этой связи мы разработали метод идентификации дискретных (узко-спектральных) волновых событий и реконструкции параметров ВГВ по результатам анализа индивидуальных вертикальных профилей температуры, плотности или квадрата частоты Брента—Вяйсяля в атмосфере планеты [6–9]. Он не требует какой-либо дополнительной информации, не содержащейся в профиле, и может быть использован для анализа вертикальных профилей, полученных любыми способами. Сформулирован и обоснован дискриминационный пороговый критерий идентификации волновых событий, при выполнении которого анализируемые вариации могут рассматриваться как волновые проявления [6–10]. Метод базируется на анализе относительной волновой амплитуды, а также на положении линейной теории ВГВ, согласно которому волновая амплитуда ограничена пороговым значением, при котором возникает динамическая (сдвиговая) неустойчивость 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 (происходит насыщение волновой амплитуды).

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 [6–12]. Разработанный нами новый метод идентификации волновых событий и реконструкции характеристик ВГВ в атмосферах планет получил широкое признание научного сообщества как в России, так и за рубежом и в настоящее время успешно применяется при исследовании волновых процессов в атмосферах планет земной группы (Земля, Венера, Марс). В частности, исследователи из Франции и Швеции в своей работе [13] 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 [6, 8–10] 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 (например, одновременно измеряются скорость ветра и температура), можно добиться значительно более полного определения характеристик волнового поля и атмосферных эффектов ВГВ. Одновременные данные о скорости ветра и температуре, полученные в ходе проведения радиозондовых 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. Измеряя 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 нами нового метода. Поскольку гипотеза о насыщении волновой амплитуды играет ключевую роль при радиофизическом мониторинге ВГВ в атмосферах планет [6–12], то радиозондовые исследования процессов насыщения в атмосфере Земли являются актуальными и важными. Знания о реальных и пороговых амплитудах также необходимы при оценке воздействия внутренних волн на невозмущенную атмосферу. Предлагаемая в работе модернизация классического метода годографа основана на комбинированном анализе одновременных измерений скорости ветра и температуры, в которой используется поляризационное соотношение между волновыми вариациями скорости и температуры с целью достижения минимальных погрешностей в результатах реконструкции характеристик внутренних волн.

Базовые соотношения для внутренних атмосферных волн и метод анализа годографа скорости ветра

Дисперсионное уравнение связывает собственную частоту волны ω (частоту, определяемую в системе отсчета, которая движется со скоростью невозмущенного потока) 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–Вяйсяля). Если для ВГВ выполняются условия гидростатического режима волн: $N_b^2 \gg \omega^2 > f^2$, $m^2 \gg k_h^2$ и $m^2 \gg (2H)^{-2}$, дисперсионное уравнение имеет вид [6, 8, 9, 14]:

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

где $(c - \bar{u})$ – собственная горизонтальная фазовая скорость волны, c – горизонтальная фазовая скорость в системе отсчета земного наблюдателя (неподвижная система отсчета), \bar{u} – проекция невозмущенной скорости ветра на направление горизонтальной компоненты волнового вектора и $H \simeq 7$ км – приведенная высота в средней атмосфере 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. Волновой 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 определяемой величиной ($\omega > 0$).

Если ось системы координат выбрана в направлении горизонтальной составляющей волнового вектора, то поляризационные соотношения приобретают очень простой вид [6, 8, 9, 14]:

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

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

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

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' — возмущение температуры; T_b — невозмущенная (средняя) абсолютная температура; g — ускорение свободного падения; 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 [6, 8]. Из уравнения (2) следует, что разность фаз между возмущениями скорости u' и v' равна 90° , а отношение амплитуд $|v'|/|u'|$ равно f/ω . Таким образом, годограф горизонтальной скорости ветра описывает эллипс и движение происходит в плоскости, перпендикулярной волновому вектору [14]. На низких частотах при $\omega \sim f$ внутренняя волна является эллиптически поляризованной поперечной волной. На более высоких частотах, когда справедливо неравенство $f/\omega \ll 1$, эллипс вырождается в прямую линию и ВГВ 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 [14]. 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 $N_b^2 \gg \omega^2 \gg f^2$. В этом случае из дисперсионного уравнения (1) получаем простую связь между собственной горизонтальной фазовой скоростью $(c - \bar{u})$, вертикальным волновым числом m и частотой Брента–Вайсяля: $|c - \bar{u}| = \omega / |k_h| = N_b / |m|$ [6]. Интервал низких собственных частот ω определяется как область частот, для которых ω^2 имеет тот же порядок, что и f^2 , но $\omega^2 > f^2$. Для вычисления профиля частоты плавучести $N_b(z)$ по данным измерений вертикального профиля температуры $T_b(z)$ мы использовали следующее выражение [6, 8, 9]:

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

где $g/c_p = 9.8 \cdot 10^{-3}$ К/м — адиабатический градиент температуры, z — локальная вертикальная координата.

Идея классического метода анализа годографа состоит в отслеживании движения (вращения) вектора возмущений скорости ветра с высотой [14, 15]. Согласно теории, волновой годограф (траектория, которую описывает конец вектора возмущений скорости, обусловленных ВГВ) имеет форму эллипса, большая ось которого параллельна направлению горизонтального распространения волны, а длины большой и малой полуосей эллипса представляют амплитуды возмущений скорости ветра вдоль горизонтальной составляющей волнового вектора и в поперечном направлении, соответственно. Собственная частота волны ω может быть определена из поляризационного соотношения (2). Более точное соотношение для нахождения ω дается выражением для аксиального (осевого) отношения AXR , в котором учтен вертикальный сдвиг поперечной компоненты средней скорости V_T ветра [14, 15]:

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

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).

Важно отметить, что практическое применение классического метода годографа к анализу радиозондовых измерений скорости ветра в атмосфере Земли сталкивается с трудностями в случаях, когда собственные частоты анализируемых ВГВ заметно превышают значения параметра Кориолиса ($\omega > 5f$). Здесь величина отношения f/ω будет мала (< 0.2), и стандартной точности определения скорости ветра ~ 1 м/с в зондовых измерениях [14] может оказаться недостаточно для качественного восстановления частоты ω из поляризационного соотношения (2). Проиллюстрируем вышесказанное на следующем примере: пусть измеренная длина большой полуоси эллипса поляризации равна ~ 5 м/с. Тогда для случая $f/\omega = 0.2$ находим, что длина малой полуоси эллипса оказывается равной ~ 1 м/с. Однако, относительная погрешность нахождения этого значения составляет $\sim 100\%$ и она же определяет точность вычисления отношения f/ω и собственной частоты ω из поляризационного соотношения (2). Кроме того, использование более точного выражения (6) для реконструкции волновых характеристик налагает дополнительное ограничение $f/\omega < 0.1$ на диапазон восстанавливаемых значений ω , вне зависимости от того, насколько точно определяется скорость ветра в радиозондовых измерениях.

Мы предлагаем усовершенствованный вариант классического метода годографа, который основан на комбинированном анализе одновременных измерений скорости ветра и температуры. Точность определения температуры в зондовых измерениях довольно высока и составляет ~ 0.2 К [14]. Для достижения минимальных погрешностей в результатах реконструкции характеристик внутренних волн используется поляризационное соотношение (4) между волновыми вариациями скорости ветра и температуры в атмосфере планеты. Здесь отношение f/ω и собственная частота ω вычисляются с хорошей точностью на основе экспериментально определяемых значений амплитуды нормированной температуры $|\hat{T}'|$ и скорости ветра $|u'|$. Модернизированный метод анализа годографа скорости ветра является актуальным для случаев, когда собственные частоты ВГВ существенно превосходят значения параметра Кориолиса.

Для исследования процессов насыщения ВГВ на основе найденного отношения f/ω мы вычисляли относительную пороговую амплитуду a сдвиговой неустойчивости [16]:

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

где $|u'_{\text{sat}}|$ – амплитуда насыщения горизонтальных возмущений скорости ветра, направленных параллельно горизонтальной компоненте волнового вектора. По результатам анализа конкретного сеанса радиозондовых измерений мы имеем две независимые оценки относительной волновой амплитуды a_e и a_u [9]:

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

Величина a_e вычисляется на основе анализа только температурных данных, в то время как при определении a_u используются измерения температуры и скорости ветра. Степень насыщения ВГВ определяется нами как отношение амплитуд $|u'|$ и $|u'_{\text{sat}}|$, которую можно найти из выражений (8) двумя разными способами [9]:

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

Таким образом, нами предлагается усовершенствованный метод годографа, который основан на комбинированном анализе одновременных измерений скорости ветра и температуры. Для достижения минимальных погрешностей в результатах реконструкции характеристик внутренних волн используется поляризационное соотношение связи между волновыми вариациями скорости ветра и температуры в атмосфере Земли. Модернизированный метод анализа годографа скорости ветра является особенно актуальным для случаев, когда собственные частоты ВГВ существенно превосходят значения параметра Кориолиса.

Работа выполнена в рамках государственного задания и частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект РФФИ № 19-02-00083 А) и Программой № 12 Президиума РАН.

Литература

1. 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. No. 7. P. 1702–1716. doi: 10.1016/j.asr.2017.10.001.
2. Губенко В.Н., Кириллович И.А. Модуляция спорадических E-слоев мелкомасштабными атмосферными волнами в высокоширотной ионосфере Земли // *Солнечно-земная физика.* 2019. Т. 5. № 3. С. 116–129. doi: 10.12737/szf-53201912.
3. 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. P. 165–178. doi: 10.1007/978-3-642-00321_9.
4. 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. V. 5. No. 1. P. 1–16. doi: 10.5194/amt-5-1-2012.
5. 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. V. 8. No. 7. P. 2885–2899. doi: 10.5194/amt-8-2885-2015.
6. 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.
7. 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.
8. 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.* 2008. V. 113. D08109. doi: 10.1029/2007JD008920.

9. 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. No. 10. P. 2153–2162. doi: 10.5194/amt-4-2153-2011.
10. 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.* 2016. Т. 59. № 12-3. С. 80–85.
11. 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.* 2016. Т. 59. № 12-2. С. 46–49.
12. Губенко В.Н., Павельев А.Г., Андреев В.Е., Кириллович И.А., Салимзянов Р.Р. Радиозатменные исследования внутренних волн и слоистых структур в атмосферах Земли, Марса и Венеры // *Монография: Современные достижения в плазменной гелиогеофизике / Под ред. Л.М. Зеленого, А.А. Петруковича, И.С. Веселовского.* – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2018. – 688 с. – ISBN 978-5-9221-1796-8, Глава IV.6, С. 560–566.
13. 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.
14. 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.
15. Hines C.O. Tropospheric mountain waves over Arecibo: A case study // *J. Atmos. Sci.* 1988. V. 46. No. 4. P. 476–488.
16. 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.