

Исследование внутренних гравитационных волн в атмосфере Земли по данным радиозатменного зондирования

М.Е. Горбунов^{1,2}, V. Kan¹

¹ *Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской Академии Наук
119017, Москва, Пыжевский пер. 3*

E-mail: gorbunov@ifaran.ru

² *Гидрометцентр России
123376, Москва, Б. Предтеченский пер. 13-1*

Мы рассматриваем основные направления исследования внутренних гравитационных волн (ВГВ) по данным радиозатменного зондирования атмосферы Земли (РЗЗА). Обсуждаются следующие подходы: (1) Анализ флуктуаций восстановленных профилей температуры. (2) Вычисление спектров флуктуаций температуры. (3) Частотно-временной анализ. (4) Анализ спектров флуктуаций амплитуды сигналов РЗЗА, основанный на теории дифракции в приближениях тонкого экрана и слабых флуктуаций. Успех исследования ВГВ по данным РЗЗА объясняется, как большим количеством наблюдений, так и применением Фурье- и пространственно-временного анализа, физической модели ВГВ и теории дифракции.

Ключевые слова: внутренние гравитационные волны; радиозатменное зондирование; анизотропия; дифракция

The Study of Internal Gravity Waves in the Earth's Atmosphere by Radio Occultations

М.Е. Gorbunov^{1,2}, V. Kan¹

¹ *A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences*

² *Hydrometcenter of Russia*

We present basic directions of the study of Internal Gravity Waves in the Earth's atmosphere by radio occultations. The following approaches are discussed: (1) The analysis of fluctuations of the retrieved temperature profiles. (2) The derivation of the temperature fluctuation spectra. (3) Space–frequency analysis. (4) The analysis of the RO amplitude fluctuation spectra, based on the diffraction theory in the framework of the phase screen and weak fluctuation approximations. The success of IGW study by RO is stimulated by a large number of RO observations and advanced techniques based on Fourier and space–time analysis, physical equations describing IGWs, and diffraction theory.

Keywords: internal gravity waves; Radio Occultation; anisotropy; diffraction

1. Введение

Внутренние гравитационные волны (ВГВ) в средней атмосфере являются главным источником флуктуаций ветра и температуры. Параметризация ВГВ и изучение их климатологии необходимы для разработки моделей глобальной циркуляции атмосферы. В данном обзоре, мы рассматриваем применение данных радиозатменного зондирования атмосферы Земли (РЗЗА) для восстановления параметров ВГВ. (3) Простейший подход использует восстановленные профили температуры. Основное предположение состоит в том, что флуктуации температуры вызваны ВГВ. Сглаженный фоновый профиль температуры определяет частоту Брента–Вайсяля, который, вместе с флуктуациями, определяет удельную потенциальную энергию ВГВ, одну из важнейших характеристик ВГВ. (4) Более детальный анализ профилей температуры основан на получении спектров

их флуктуаций. Для насыщенных ВГВ спектры должны подчиняться степенному закону с показателем -3 . (6) Более продвинутый метод использует частотно-временной анализ. Он основан чувствительных к фазе представлениях, таких как кросс S- и вейвлет-преобразования. (7) Анализ спектров флуктуаций амплитуды сигналов РЗЗА, основанный на теории дифракции в приближениях тонкого экрана и слабых флуктуаций. Два параметра спектра, внешний масштаб и структурная константа, определяют удельную потенциальную энергию.

2. Свойства внутренних гравитационных волн

ВГВ в атмосфере являются осциллирующими отклонениями от фонового состояния при стабильной стратификации, плавучесть является возвращающей силой [1] Описание ВГВ строится в приближении малых плосковолновых возмущений x -, y - и z -компонент скорости ветра, u' , v' и w' , соответственно, и относительных возмущений температуры $\theta'/\bar{\theta}$, давления p'/\bar{p} и плотности $\rho'/\bar{\rho}$, где штрих обозначает возмущение, а надчеркивание – фоновое значение. Плоская волна имеет следующую форму: $\exp[i(\mathbf{k}\mathbf{r} - \omega t) + z/2H]$, где $\mathbf{k} = (k_x, k_y, k_z)$ – вектор пространственных частот, $\mathbf{r} = (x, y, z)$ – вектор координат, ω – временная частота, и H – характерный вертикальный масштаб атмосферы

$$\bar{\rho}(z) = \bar{\rho}_0 \exp\left(-\frac{z-z_0}{H}\right). \quad (1)$$

Типичное значение H около 7 км.

Дисперсионное соотношение выводится из системы уравнений гидродинамики, линеаризованных по отношению к малым возмущениям. Для этого вводятся параметр Кориолиса f и частота Брента–Вяйсяля ω_{BV} :

$$f = 2\Omega \sin\phi, \quad \omega_{BV}^2 = \frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\gamma-1}{\gamma} \frac{g^2}{R_d T} + \frac{g}{T} \frac{dT}{dz}, \quad (2)$$

где Ω – угловая скорость вращения Земли,

ϕ – геодезическая широта,

g – ускорение силы тяжести,

$\gamma = C_p/C_v = C_p/(C_p - R_d) \approx 1.4$ – отношение теплоемкостей сухого воздуха при постоянном давлении и объеме,

$R_d = 287.06$ Дж К⁻¹ · кг⁻¹ – газовая постоянная сухого воздуха. Это приводит к дисперсионному соотношению для ВГВ:

$$\kappa_z^2 = \kappa_{\perp}^2 \frac{\omega_{BV}^2 - \hat{\omega}^2}{\hat{\omega}^2 - f^2} - \frac{1}{4H^2}, \quad (3)$$

где $\hat{\omega}$ – внутренняя частота $\hat{\omega} = \omega - \kappa_x \bar{u} - \kappa_y \bar{v}$, отнесенная к системе координат, движущейся вместе с воздушной массой, а горизонтальная пространственная частота $\kappa_{\perp} = \sqrt{\kappa_x^2 + \kappa_y^2}$. Из дисперсионного соотношения следует, что $\kappa_{x,y}$ не может обращаться в нуль, т.е. ВГВ не могут распространяться строго вертикально, что важно, т.к.

обращение данных РЗЗА основано на предположении сферически-слоистой структуры атмосферы. Другой вывод состоит в том, что у внутренней частоты есть верхний и нижний пределы: $|f| < \hat{\omega} < \omega_{BV}$.

ВГВ образуют случайный ансамбль, статистически описываемый спектральной плотностью. Типичная модель вертикального 1-мерного спектра насыщенных ВГВ [1] имеет следующий вид:

$$\Phi_1(\kappa_z) = C_1 \frac{\kappa_z^s}{\kappa_{\text{ext}}^{s+\mu_1} + \kappa_z^{s+\mu_1}} \sim C_1 \kappa_z^{-\mu_1}, \quad (4)$$

где C_1 – нормировочная константа,

s – показатель степени для низких частот,

$-\mu_1$ – показатель степени для высоких частот;

$\kappa_{\text{ext}} = 2\pi/L_{\text{ext}}$ – внешнее вертикальное волновое число, соответствующее внешнему масштабу L_{ext} .

Последнее выражение является высокочастотной асимптотикой. Типичное значение μ_1 для ВГВ равно 3.

Следующий 3-мерный анизотропный спектр ВГВ использовался в [2]:

$$\Phi_3(\mathbf{\kappa}) = C_3^2 \eta^2 (\kappa_z^2 + \eta^2 \kappa_{\perp}^2 + \kappa_{\text{ext}}^2)^{-\mu_3/2}, \quad (5)$$

где C_3 – структурная постоянная, η – коэффициент анизотропии, и $-\mu_3$ – показатель степени. 1-Мерный спектр получается из 3-мерного интегрирование по $\kappa_{x,y}$, при этом $\mu_3 = \mu_1 + 2$. Типичное значение μ_3 , таким образом, равно 5.

Как показано в [3], при лимбовом зондировании значения анизотропии, превосходящие величину около 30, неразличимы. Горизонтальная длина волны ВГВ меняется от десятков до тысяч километров, тогда как горизонтальное разрешение при лимбовом зондировании составляет сотни километров. Таким образом, РЗЗА чувствительно только к низкочастотной части горизонтального спектра. Однако РЗЗА может разрешать вертикальную структуру ВГВ с ее характерными масштабами от нескольких сотен метров до нескольких километров. Таким образом, ВГВ с точки зрения РЗЗА являются анизотропными структурами с $\eta \gtrsim 30$. Это объясняет, почему простая модель с постоянной анизотропией успешно используется для ВГВ при помощи РЗЗА.

Пренебрегая последним членом в дисперсионном соотношении **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, соответствующим большому вертикальному периоду $4\pi H$, т.е. десятки километров, и принимая, что $\hat{\omega} \ll \omega_{BV}$ и $\eta \sim \kappa_z/\kappa_{\perp}$, мы получаем простую оценку:

$$\hat{\omega} = \sqrt{\frac{\omega_{BV}^2}{\eta^2} + f^2}.$$

Поскольку характерный период Брента–Вяйсяля $T_{BW} = 2\pi/\omega_{BV}$ составляет около 5 мин., а f соответствует периодам свыше 12, мы можем принять, что $f \ll \omega_{BV}/\eta$. Следовательно наблюдения РЗЗА чувствительны к ВГВ с внутренними периодами $T_{IGW} = 2\pi/\hat{\omega} \sim \eta T_{BW}$, т.е. несколько часов. Другой вывод состоит в том, что анизотропия равна:

$$\eta_{\max} = \frac{\omega_{\text{BV}}}{f} \gtrsim 150. \quad (6)$$

Важной характеристикой ВГВ является удельная энергия, равная сумме кинетической энергии E_k и потенциальной энергии E_p [4]:

$$\begin{aligned} E_k &= \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}), \\ E_p &= \frac{1}{2} \left(\frac{g}{\omega_{\text{BV}}} \right)^2 \overline{\left(\frac{T'}{T} \right)^2}, \end{aligned} \quad (7)$$

где надчеркивание обозначает усреднение. Наблюдения РЗЗА нечувствительны к скорости ветра, они позволяют восстанавливать лишь профиль флуктуаций температуры T' . Тем не менее, если известен степенной временной спектр ВГВ $\sim \omega^{-p}$, в рамках линейной теории $E_k = pE_p$ [5], где характерное значение p равно 5/3. Следовательно, флуктуации температуры могут характеризовать активность ВГВ.

3. Работы, основанные на восстановленных профилях температуры

Детальный обзор техники РЗЗА дан в [6]. Восстановленный показатель преломления n может быть записан как $1 + N$, где единица отвечает вакууму. Для сухой атмосферы индекс рефракции N равен:

$$N = K_1 \frac{P}{T} = K_1 R_d \rho, \quad (8)$$

где P – атмосферное давление,

$K_1 = 77.6 \times 10^{-6}$ К/гПа. По профилю $N(z)$ в предположении сухой атмосферы можно восстановить температуру, используя уравнения гидростатики и состояния.

Для флуктуаций температуры можно записать:

$$\frac{T'}{T} = -\frac{N'}{N} + \frac{P'}{P} \approx -\frac{N'}{N} = -\frac{\rho'}{\rho}. \quad (9)$$

Следовательно, можно рассматривать спектры относительных флуктуаций индекса рефракции.

Алгоритм обращения основан предположении сферической симметрии атмосферы. Для оценки параметров ВГВ, которые можно восстановить в этом предположении, рассмотрим структуру с вертикальным масштабом Δh и анизотропией η . Характерная длина взаимодействия между прямым лучом и сферическим слоем толщиной Δh равна $L = \sqrt{2a\Delta h}$, где a – радиус Земли, как показано на рис. 1. Для восстановления анизотропной структуры требуется, чтобы $L \lesssim \eta\Delta h$. Это приводит к оценке анизотропии: $\eta \gtrsim \eta_{\min} = \sqrt{2a/\Delta h}$. Для вертикального масштаба $\Delta h = 2$ км, анизотропия должна превосходить величину около $\eta_{\min} \approx 80$, а для $\Delta h = 10$ км – $\eta_{\min} \approx 35$.

Первое исследование ВГВ основанное на данных GPS/MET [7] описанное в [4], было основано на восстановленных профилях температуры $T(z)$. Активность ВГВ характеризовалась вариациями температуры с масштабами от 2 до 10 км. Величины $T'(z)$ и $T(z)$ позволили определить ω_{BV} и E_p .

Проект Challenging Minisatellite Payload (CHAMP) [8] обеспечил большее количество наблюдений, по сравнению с экспериментом GPS/MET, что стимулировало дальнейшее

изучение ВГВ по данным РЗЗА. В работе [9], также основанной на анализе флуктуаций температуры, были найдены корреляции активности ВГВ и ионосферными возмущениями.

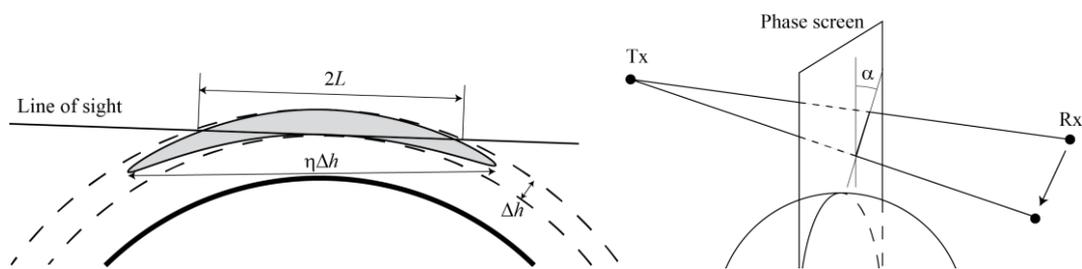


Рис. 1 (слева). Геометрия зондирования сильно анизотропных неоднородностей.

Рис. 2 (справа). Геометрия фазового экрана.

Проект Constellation Observing System for Meteorology Ionosphere and Climate (COSMIC) [10] ознаменовал значительный прогресс в технике РЗЗА, обеспечив большое количество высококачественных данных. В [11] были проанализированы флуктуации температуры, основанные на наблюдениях COSMIC за годы 2006–2013, дополненные данными рэлеевского лидара в обсерватории Верхнего Прованса. Были получены сезонные вариации E_p .

4. Восстановленные спектры флуктуаций температуры

В [12] были получены спектры флуктуаций температуры по данным GPS/MET; ожидалось, что они будут подчиняться степенному закону для насыщенных ВГВ (4):

$$\Phi_T(k_z) \approx \frac{\omega_{BV}^4}{6g^2p} k_z^{-3}. \quad (10)$$

Вычисление спектров было ограничено интервалом волновых чисел от 0.1 до 1.0 цикл/м, что соответствует вертикальным масштабам от 1 до 10 км. Геометрооптический алгоритм обращения обеспечивал вертикальное разрешение не лучше 1.5 км. Полученные спектры отклонялись от ожидаемого степенного закона k_z^{-3} : 1) плато на низких частотах при длинах волн свыше 5 км и 2) более крутой наклон после плато. Это иллюстрирует степень влияния «наблюдательного фильтра» [1] на восстановление температуры.

В [13] также вычислялись спектры флуктуаций температуры. При восстановлении температуры использовалось более узкое окно фильтрации по сравнению с обработкой в University Corporation of Atmospheric Research (UCAR). Это позволило добиться значительно лучшего согласия с теоретическим степенным спектром k_z^{-3} . Однако в [14] было указано, что заявленное разрешение лучше масштаба Френеля не могло быть достигнуто в рамках геометрооптического алгоритма, а спектральный наклон -3 , скорее всего, является следствием измерительных шумов. В [15] для обработки данных COSMIC был использован алгоритм обращения, основанный на волновой оптике в диапазоне высот 20–30 км; это позволило получить спектры, существенно лучше согласующиеся с теоретическим, вплоть до частот 4×10^{-3} цикл/м, что соответствует масштабу 250 м. Сравнение с геометрооптическими спектрами показало, что волновая оптика обеспечивает лучшее согласие с теорией также для масштабов, превосходящих масштаб Френеля.

5. Частотно-временной анализ

В [16] описан анализ температуры, полученных из данных COSMIC и CHAMP, с применением S-преобразования, что позволило определить ряд параметров ВГВ, включая горизонтальное направление распространения. Мотивировкой работы был тот факт, что фильтрация профилей температуры по отношению к k_z сама по себе не разделяет планетарные волны (такие как волны Кельвина) и ВГВ.

S-преобразование разновидностью скользящего преобразования Фурье типа вейвлет-преобразования с гауссовой весовой функцией. Для функции $x(t)$ S-преобразование $\hat{x}(t, \nu)$, являющееся функцией времени t и частоты ν , и его обращение выражаются следующим образом:

$$\hat{x}(t, \nu) = \int x(\tau) |\nu| \exp(-\pi(t - \tau)^2 \nu^2) \exp(-i2\pi\nu\tau) d\tau, \quad (11)$$

$$x(t) = \iint \hat{x}(\tau, \nu) \exp(i2\pi\nu\tau) d\nu d\tau. \quad (12)$$

S-преобразование чувствительно к абсолютной фазе сигнала $x(t)$, что критично в дальнейшем рассмотрении. Кросс-S-преобразование двух сигналов $x(t)$ и $y(t)$ определено как $\hat{x}(t, \nu) \hat{y}^*(t, \nu)$, где звездочка обозначает комплексное сопряжение.

Комбинированный массив данных COSMIC и CHAMP включает большое количество профилей, что позволило определять фоновую температуру на основе горизонтальных масштабом так, чтобы подавить планетарные волны. К данным было применено S-преобразование по долготе, что позволило получить зональные гармоники как функции широты и долготы. Зональные волновые числа от 0 до 6 считались фоновым полем, включающим вклад планетарных волн. Температурные вариации ВГВ $T'(z)$ и длина волны доминантной моды $\lambda_z(z)$ были также определены при помощи S-преобразования. Анализ включал вертикальные масштабы от 4 до 15 км. Применение S-преобразования в [16] позволило оценить горизонтальные длины волн λ_h для ВГВ. Оценка была основана на разностях фаз $\Delta\varphi_{ij}$ между i -м и j -м событиями для доминантного волнового числа в выбранной группе событий, относящихся к той ВГВ. Горизонтальный волновой вектор (k_x, k_y) был получен из переопределенной линейной системы:

$$\Delta\varphi_{ij} = k_x(x_i - x_j) + k_y(y_i - y_j). \quad (13)$$

Для диапазона высот 17.5–22.5 км λ_z составляла от 4.8 км до 8.4 км, а λ_h менялась от 1500 до 4500 км. Таким образом, обнаруженные ВГВ обладали значительной анизотропией η , приближающейся к η_{\max} ; такие структуры хорошо восстанавливаются при помощи РЗЗА. В [17] описано применение техники S-преобразования для идентификации пар сеансов COSMIC, где наблюдалась одна и та же ВГВ. Найденное распределение горизонтальных длин волн охватывало масштабы от 1000 до 4000 км с медианой около 1200 км и средним 1580 км.

Техника определения горизонтальной и вертикальной длин волн была применена в [18] для определения потока импульса (ПИ):

$$MF = \rho \frac{\lambda_z}{\lambda_h} E_p \sim \frac{\lambda_z^3}{\lambda_h}. \quad (14)$$

ВГВ с малой анизотропией и большой вертикальной длиной волны вносят наибольший вклад в ПИ.

В [19] были проанализированы наблюдения CHAMP (сентябрь 2001 – август 2006) и COSMIC (сентябрь 2006 – март 2010), а также наземные наблюдения зонального и меридионального ветра и температуры, спутниковые наблюдения Национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA) уходящей длинноволновой радиации и реанализы ERA-interim Европейского Центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF). Анализ был основан на флуктуациях температуры T' , полученных вычитанием среднезональных профилей на каждой высоте и для каждого дня. Цели исследования включали: (а) получение пространственно-временные симметричные спектры в районе экватора в полосе широт 10°S – 10°N , для выделения экваториальных волновых мод (волны Кельвина), смешанных Россби–гравитационных волн, экваториальных волн Россби и ВГВ; (б) оценка взаимодействия волн со средним потоком и ПИ; (с) широтная и сезонная изменчивость; и (д) долготное и сезонное распределение энергии ВГВ в нижней тропической стратосфере, и ее долгосрочные вариации по отношению к конвективной активности, в течение разных фаз квази-двухлетней осцилляции. Спектры были разложены на симметричную и антисимметричную компоненты, ответственных за разные типы волн. Нечетные меридиональные номера мод в симметричных спектрах описывают волны Кельвина (–1), экваториальные волны Россби (3) и ВГВ (3). Четная меридиональная мода 0 в симметричных спектрах описывает смешанные Россби–гравитационных волны. Вертикальное волновое число определялось из дисперсионного соотношения **Ошибка!** **Источник ссылки не найден.** Это позволило найти долгосрочные вариации ВГВ, потенциальной энергии и ПИ.

6. Применение теории дифракции

В [20] параметры ВГВ были получены по данным РЗЗА с использованием подхода, основанного на теории дифракции, изначально предложенного в [3, 2] для звездных оккультаций. Эти работы использовали спектр относительных флуктуаций индекса рефракции с постоянной анизотропией (4). Масштаб Френеля для геометрии РЗЗА и длин волн систем глобальной спутниковой навигации составляет около 1.5 км, что существенно больше внутреннего масштаба ВГВ l_{int} , лежащего в диапазоне 10–100 м в стратосфере, поэтому влиянием внутреннего масштаба можно пренебречь.

Интегрируя $\Phi_3(\mathbf{k})$ по горизонтальным волновым числам $k_{x,y}$, мы получаем 1-мерный односторонний ($k_z \geq 0$) вертикальный спектр, обобщающий (10).

$$V(k_z) = \frac{4\pi}{3} C_3^2 \left(k_z^2 + \frac{4\pi^2}{L_{\text{ext}}^2} \right)^{-\frac{3}{2}}. \quad (15)$$

Внешний масштаб L_{ext} в стратосфере составляет несколько километров [21]. Этот параметр определяет переход от ненасыщенного к насыщенному режиму. В итоге структурная постоянная остается единственным параметром, характеризующим 1-мерный спектр в режиме насыщения. Пользуясь (10), мы получаем следующее выражение:

$$C_3^2 = \frac{\omega_{\text{BV}}^4}{8\pi g^2 p}. \quad (16)$$

Дальнейшее рассмотрение основано на приближениях фазового экрана и слабых флуктуаций [3]. 3-Мерная атмосфера представляется тонким экраном с эквивалентным фазовым набегом, расположенным в окрестности перигея луча. Спектр флуктуаций эйконала записывается следующим образом:

$$V_{\psi}(\kappa_z) = \frac{\overline{\psi}^2}{\sqrt{1+\kappa_z^2 H^2}} V(\kappa_z), \quad (17)$$

где $\overline{\psi} = \sqrt{\pi R_E H \overline{N}}$ – средний эйконал.

В эксперименте РЗЗА измеряется амплитуда A радиосигнала. Флуктуации логарифма относительной амплитуды $\chi = \ln(A/\overline{A})$ считаются слабыми, если $\delta\chi \approx \delta A/\overline{A} \ll 1$. Проекция перигеев лучей на фазовый экран во время сеанса измерений образует линию под углом α по отношению к местной вертикали, как показано на Рис. 2. Если $\tan\alpha < \eta$, то геометрию наблюдений можно считать вертикальной, и амплитуду можно считать функцией только высоты перигея. Это условие удовлетворяется, если $\alpha \lesssim 89^\circ$, т.е. практически для всех наблюдений. Спектр флуктуаций амплитуды записывается следующим образом:

$$V_{\chi}(\kappa_z) = k^2 \sin^2 \frac{\kappa_z^2}{\kappa_F^2} V_{\psi}(\kappa_z), \quad (18)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число,

λ – длина волны,

$\kappa_F = 2\pi/\rho_F$, $\rho_F = \sqrt{\pi q \lambda D}$ – вертикальный масштаб Френеля,

q – рефракционное ослабление,

$D = D_R D_T / (D_R + D_T)$ – приведенное расстояние наблюдения,

$D_{R,T}$ – расстояния от приемника R и передатчика T до перигея луча. Тогда выражение для спектра флуктуаций относительной амплитуды принимает следующую форму:

$$V_{\chi}(\kappa_z) = \frac{4\pi}{3} k^2 C_3^2 \sin^2 \frac{\kappa_z^2}{\kappa_F^2} \frac{\overline{\psi}^2}{\sqrt{1+\kappa_z^2 H^2}} \left(\kappa_z^2 + \frac{4\pi^2}{L_{\text{ext}}^2} \right)^{-\frac{3}{2}}. \quad (19)$$

Два параметра спектра ВГВ (15), L_{ext} и C_3 определяют удельную потенциальную энергию E_p , как следует из (7) и (16):

$$E_p = \frac{1}{2} \left(\frac{g}{\omega_{\text{BV}}} \right)^2 \int V(\kappa_z) d\kappa_z = \frac{1}{6\pi} \left(\frac{g}{\omega_{\text{BV}}} \right)^2 C_3^2 L_{\text{ext}}^2 = \frac{g}{12\pi \sqrt{2\pi p}} C_3 L_{\text{ext}}^2. \quad (20)$$

Эти два параметра можно определить из экспериментальных оценок спектров флуктуаций (19). По сравнению со звездными оккультациями, вычисления проще, поскольку не нужно учитывать колмогоровскую турбулентность, чье влияние на РЗЗА пренебрежимо мало, благодаря относительно большой длине волны по сравнению с оптическим диапазоном. С другой стороны, ионосферные сцинтилляции и близость масштаба Френеля к внешнему масштабу являются источниками ошибок. Для определения L_{ext} и C_3 , теоретические спектры путем подбора параметров подгоняются под экспериментальные, усредненные по пространственно-сезонным ячейкам.

В [20] были проанализированы данные COSMIC за 15 дней, равномерно распределенные по весне 2011, всего около 27000 сеансов. Данные были разделены по

широтным зонам $0^\circ\text{--}20^\circ$, $20^\circ\text{--}40^\circ$, $40^\circ\text{--}60^\circ$, и $60^\circ\text{--}90^\circ$. Использовались лишь наблюдения ниже 32 км, где влияние ионосферы мало. Нижний предел высоты был выбран равным 1 км над тропопаузой, чтобы избавиться от больших градиентов температуры. Спектры вычислялись для участков записей длиной 8 км и с шагом 2 км. В конечном счете, минимальная высота для оценки спектральных параметров менялась от 16 км в полярных областях до 22 км в тропиках, а максимальная высота была 28 км. Это позволило оценить внешний масштаб L_{ext} , который менялся от 2 км в полярных областях до 3.5 км в тропиках. В [22] представлен более детальный статистический анализ данных COSMIC, включая профили L_{ext} , C_3 и дисперсию температуры для разных широтных зон и для всех сезонов.

7. Заключение

В данном обзоре мы рассмотрели различные методы восстановления параметров ВГВ по данным РЗЗА. Простейший подход к восстановлению параметров ВГВ использует возмущения профилей температуры по отношению к фоновым профилям, описывающим крупномасштабные структуры, не относящиеся к ВГВ. Ряд работ посвящены получению оценок удельной потенциальной энергии E_p и ее климатологии на основе флуктуаций температуры. Применение геометрикооптического алгоритма приводит к спектрам флуктуаций температуры с переменным наклоном, вместо ожидаемого степенного закона k_z^{-3} . Методы волновой оптики улучшили согласие спектров с теорией. Спектр ВГВ обладает крутым наклоном, и его интегральные параметры, такие как E_p , определяются крупными масштабами.

Анализ, основанный на S- или вейвлет-преобразовании, позволил идентифицировать распространяющиеся ВГВ, пользуясь разностями фаз и дисперсионным соотношением. Он также показал, что ВГВ являются структурами с высокой анизотропией. Этот подход, дополненный анализом спектральных симметрий, привел к разделению ВГВ и планетарных волн разных типов. Техника одновременного определения горизонтальной и вертикальной длины волны позволила определять ПИ.

Другое направление восстановления параметров ВГВ было основано на применении теории дифракции. В приближениях фазового экрана и слабых флуктуаций было получено аналитическое выражение для спектра флуктуаций амплитуды как функции двух параметров спектра ВГВ: внешнего масштаба L_{ext} и структурной постоянной C_3 . Эти параметры получаются путем подгонки экспериментальных спектров, усредненных в пространственных и сезонных ячейках. Полученные спектры амплитудных флуктуаций согласуются с предположением о большой анизотропии ВГВ. По сравнению с анализом профилей температуры, такой подход имеет преимущество: здесь используются исходные наблюдения амплитуды без какой-либо обработки. Его недостатком является то, что масштаб Френеля ρ_F для геометрии РЗЗА близок к L_{ext} .

Таким образом, получение параметров ВГВ по данным РЗЗА широко применяется и было стимулировано большим количеством наблюдений. При этом используются современные методы, основанные на Фурье- и пространственно-временном анализе, а также теории дифракции, что обеспечило успех исследований ВГВ по данным РЗЗА.

Разделы 1–4 работы выполнены при поддержке госзадания Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (FMWR-2022-0016). Разделы 5–7 работы выполнены при поддержке госзадания Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (тема 17.1).

Литература

1. Fritts, D.C. and Alexander, M.J. Gravity waves dynamics and effects in the middle atmosphere // *Rev. Geophys.* 2003. 41(1). 1003.
2. Sofieva, V.F., Gurvich, A.S., Dalaudier, F. and Kan, V. Reconstruction of internal gravity wave and turbulence parameters in the stratosphere using GOMOS scintillation measurements // *J. Geophys. Res.* 2007. 112(D12). D12113.
3. Gurvich, A.S. and Brekhovskikh, V.L. Study of the turbulence and inner waves in the stratosphere based on the observations of stellar scintillations from space: A model of scintillation spectra // *Waves Random Media.* 2001. 11(3). 163–181.
4. Tsuda, T., Nishida, M., Rocken, C. and Ware, R.H. A global morphology of gravity wave activity in the stratosphere revealed by the GPS occultation data (GPS/MET) // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2000. 105(D6). 7257–7273.
5. VanZandt, T.E. A model for gravity wave spectra observed by Doppler sounding systems // *Radio Sci.* 1985. 20(6), 1323–1330.
6. Горбунов М.Е. Физические и математические принципы спутникового радиозатменного зондирования атмосферы Земли. – М.: ГЕОС, 2019. – 300 с. – ISBN 978-5-89118-780-1.
7. Ware, R., Rocken, C., Solheim, F., Exner, M., Schreiner, W., Anthes, R., Feng, D., Herman, B., Gorbunov, M., Sokolovskiy, S., Hardy, K., Kuo, Y., Zou, X., Trenberth, K., Meehan, T., Melbourne, W. and Businger, S. GPS Sounding of the Atmosphere from Low Earth Orbit: Preliminary Results', *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 1996. 77(1), 19–40.
8. Wickert, J., Reigber, C., Beyerle, G., König, R., Marquardt, C., Schmidt, T., Grunwaldt, L., Galas, R., Meehan, T. K., Melbourne, W. G. and Hocke, K. (2001), 'Atmosphere sounding by GPS radio occultation: First results from CHAMP // *Geophys. Res. Lett.* 28(17), 3263–3266.
9. Hocke, K. and Tsuda, T. Gravity waves and ionospheric irregularities over tropical convection zones observed by GPS/MET radio occultation // *Geophys. Res. Lett.* 2001. 28(14), 2815–2818.
10. Rocken, C., Kuo, Y.-H., Schreiner, W. S., Hunt, D., Sokolovskiy, S. and McCormick, C. COSMIC System Description // *Terr. Atmos. Ocean. Sci.* 2000. 11(1), 21–52.
11. Khaykin, S. M., Hauchecorne, A., Mzй, N. and Keckhut, P. Seasonal variation of gravity wave activity at midlatitudes from 70.167emyears of COSMIC GPS and Rayleigh lidar temperature observations // *Geophys. Res. Lett.* 2015. 42(4), 1251–1258.
12. Steiner, A. K. and Kirchengast, G. Gravity Wave Spectra from GPS/MET Occultation Observations // *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2000. 17(4). 495–503.
13. Tsuda, T. and Hocke, K. Vertical Wave Number Spectrum of Temperature Fluctuations in the Stratosphere using GPS Occultation Data // *J. Meteor. Soc. Japan. Ser. II.* 2002. 80(4B), 925–938.
14. Marquardt, C. and Healy, S. B. Measurement Noise and Stratospheric Gravity Wave Characteristics Obtained from GPS Occultation Data // *J. Meteor. Soc. Japan. Ser. II.* 2005. 83(3), 417–428.
15. Tsuda, T., Lin, X. and Hayashi, H. Analysis of vertical wave number spectrum of atmospheric gravity waves in the stratosphere using COSMIC GPS radio occultation data // *Atmos. Meas. Tech.* 2011. 4(8), 1627–1636.
16. Wang, L. and Alexander, M. J. Global estimates of gravity wave parameters from GPS radio occultation temperature data // *J. Geophys. Res.* 2010. 115, D21122.
17. McDonald, A. J. Gravity wave occurrence statistics derived from paired COSMIC/FORMOSAT3 observations // *J. Geophys. Res.* 2012. 117(D15), D15406.
18. Schmidt, T., Alexander, P. and Torre, A. Stratospheric gravity wave momentum flux from radio occultations // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2016. 121(9), 4443–4467.

19. Nath, D., Chen, W. and Guharay, A. Climatology of stratospheric gravity waves and their interaction with zonal mean wind over the tropics using GPS RO and ground-based measurements in the two phases of QBO // *Theor. Appl. Climatol.* 2014. 119(3-4), 757–769.
20. В. Кан, М. Е. Горбунов, А. В. Шмаков, В. Ф. Софиева, Восстановление параметров внутренних волн в атмосфере по флуктуациям амплитуды сигнала в радиозатменном эксперименте, *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, 2020, том 56, № 5, с. 499–513.
21. Tsuda, T., VanZandt, T. E., Mizumoto, M., Kato, S. and Fukao, S. Spectral analysis of temperature and Brunt-Vaisala frequency fluctuations observed by radiosondes // *J. Geophys. Res. Atmos.* 1991. 96(D9), 17265–17278.
22. В. Кан, М.Е. Горбунов, О.В. Федорова, В.Ф. Софиева, Широтное распределение параметров внутренних волн в атмосфере по флуктуациям амплитуды радиозатменных сигналов, *Изв. РАН, Физика атмосферы и океана*, 2020, том 56, № 6, с. 647–659.