Секция В. Физика атмосферы Земли, включая околоземное космическое пространство. БШФФ-2026. С. 277–280.

УДК 550.388.2
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-277

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕМЕЩАЮЩИХСЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ПО ДАННЫМ ИРКУТСКОГО РАДАРА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ И ИОНОЗОНДОВ

В.В. Ковалева[1], В.П. Лебедев[1]

[1]Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия, veronika_kovaleva@iszf.irk.ru

STUDY OF TRAVELING IONOSPHERIC DISTURBANCES, BASED ON DATA FROM THE IRKUTSK INCOHERENT SCATTER RADAR AND IONOSONDES

V.V. Kovaleva[1], V.P. Lebedev[1]

[1]Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, veronika_kovaleva@iszf.irk.ru

Аннотация. Рассматривается вывод полного дисперсионного уравнения акустико-гравитационных волн (АГВ) в сжимаемой вращающейся стратифицированной атмосфере. Уравнение одновременно учитывает стратификацию, сжимаемость среды и силу Кориолиса и является наиболее общим из рассматриваемых приближений: классические соотношения Буссинеска, Тейлора—Гольдштейна и Хайнса являются его частными случаями. На основе линеаризованных уравнений гидродинамики получены выражения для плотности волновой энергии как функции горизонтальной длины волны и азимута распространения. Построены полярные диаграммы, демонстрирующие азимутальную анизотропию АГВ при различных направлениях фонового нейтрального ветра. Показано, что при малых горизонтальных длинах волн (100–200 км) ветровая фильтрация существенна, тогда как при длинах волн ~1000 км ее вклад заметно снижается.

Ключевые слова: акустико-гравитационные волны, дисперсионное уравнение, перемещающиеся ионосферные возмущения, ветровая фильтрация, плотность волновой энергии.

Abstract. The derivation of the full dispersion equation for acoustic-gravity waves (AGWs) in a compressible, rotating, stratified atmosphere is considered. The equation simultaneously accounts for stratification, compressibility, and the Coriolis force, and is the most general among the approximations considered: the classical Boussinesq, Taylor–Goldstein, and Hines relations are its particular cases. Using the linearized hydrodynamic equations, we obtained expressions for wave energy density as functions of horizontal wavelength and propagation azimuth. Polar diagrams illustrating the azimuthal anisotropy of AGWs under various background neutral wind directions are constructed. It is shown that the wind filtering is significant at short horizontal wavelengths (100–200 km), whereas its contribution decreases noticeably at wavelengths of about 1000 km.

Keywords: acoustic-gravity waves, dispersion equation, traveling ionospheric disturbances, wind filtering, wave energy density.

ВВЕДЕНИЕ

Перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ) представляют собой ионосферное проявление акустико-гравитационных волн (АГВ), распространяющихся в стратифицированной сжимаемой вращающейся атмосфере [Hocke, Schlegel, 1996; Fritts, Alexander, 2003]. Радары некогерентного рассеяния (НР) являются одним из ключевых инструментов диагностики ионосферы: Иркутский радар НР в сочетании с ионозондом DPS-4 обеспечивают восстановление пространственно-временной структуры ПИВ методом кросс-кореляционного анализа данных пространственно разнесенных инструментов [Медведев и др., 2009; Medvedev et al., 2013]. Точная интерпретация ионосферных наблюдений требует строгого теоретического описания волновых возмущений, учитывающего одновременно стратификацию, сжимаемость среды и вращение Земли [Holton, Hakim, 2013; Gill, 1982]. Существующие приближения — несжимаемое (Буссинеск), с учетом сдвигового течения (Тейлор—Гольдштейн) и с учетом сжимаемости (Хайнс) — не охватывают каждое в отдельности полного диапазона масштабов ПИВ. В настоящей работе выведено полное дисперсионное уравнение АГВ и исследованы энергетические характеристики волн при различных сценариях фонового нейтрального ветра.

ДИСПЕРСИОННОЕ УРАВНЕНИЕ АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН

Рассматривается сжимаемая невязкая жидкость во вращающейся декартовой системе координат (x, y, z). Исходная замкнутая система уравнений включает уравнение движения с силой Кориолиса, уравнение неразрывности для сжимаемой среды, гидростатическое условие равновесия, уравнение сохранения потенциальной температуры и уравнение состояния идеального газа [Holton, Hakim, 2013; Gill, 1982]:

$$\frac{dU}{dt} - \Omega_c V + \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} = X,$$
$$\frac{dV}{dt} + \Omega_c U + \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} = Y,$$
$$\frac{dW}{dt} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} + g = 0,$$
$$\frac{1}{\rho}\frac{dp}{dt} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0,$$
$$\frac{d\theta}{dt} = 0,$$

где d/dt — полная (адвективная) производная; (U, V, W) — компоненты вектора скорости жидкости; X, Y — внешние силы, которые могут включать волновые силы и эффекты диффузионного

перемешивания, сопровождающие рассеяние волн; p — давление, ρ —плотность ($\rho = \rho_0 exp[-\frac{(z-z_0)}{H}]$), где $\rho_0 = \rho(z_0)$ – плотность на начальном уровне z_0; H — высота однородной атмосферы); $\Omega_c = 2\Omega sin\varphi$ — параметр Кориолиса, где Ω — скорость вращения Земли, φ — широта.

Пять уравнений вместе с определением потенциальной температуры θ образуют полную замкнутую систему, описывающую движение невязкой жидкости [Holton, Hakim, 2013]:

$$\theta = \frac{p}{\rho R}(\frac{p_0}{p})^k,$$

где $p_0 = p(z_0)$ — давление на высоте z_0, R — газовая постоянная идеального газа, $k = R/c_p$ — отношение газовой постоянной и теплоемкости при постоянном давлении.

После линеаризации относительно горизонтально однородного гидростатического фонового состояния с ветром ($\bar{U}$, $\bar{V}$, 0) и подстановки возмущений в виде плоских волн вида

$$(U', V', w', \frac{\theta'}{\bar{\theta}}, \frac{p'}{\bar{p}}, \frac{\rho'}{\bar{\rho}}) = (\tilde{U}, \tilde{V}, \tilde{w}, \tilde{\theta}, \tilde{p}, \tilde{\rho})\, exp[i(\vec{k}\vec{r} - \omega t) + \frac{z}{2H}]$$

получена однородная алгебраическая система для амплитуд возмущений. Приравнивая нулю определитель матрицы коэффициентов, получаем полное дисперсионное уравнение:

$$\hat{\omega}^2 = N^2 k_h^2 + \Omega_c^2 (k_z^2 + \frac{1}{4H^2}) / [k^2 + \frac{1}{4H^2} - \frac{(\omega^2 - \Omega_c^2)}{c_s^2}]. \quad (1)$$

где $k_h^2 = k_x^2 + k_y^2$, $k = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2$ $\hat{\omega} = \omega - k_x\bar{U} - k_y\bar{V}$ — собственная частота (с учетом доплеровского сдвига), $N = \sqrt{\frac{g\partial ln\theta}{\partial z}}$ — частота Брента–Вяйсяля, Ω_c — параметр Кориолиса, H — высота однородной атмосферы, c_s — скорость звука.

Уравнение (1) является наиболее общим из рассматриваемых приближений. Предельный переход $\Omega_c \to 0$ дает приближение Хайнса, дополнительный переход $c_s \to \infty$ (несжимаемая среда) — приближение Буссинеска. Таким образом, все три классических соотношения являются его частными случаями. Анализ показывает, что для масштабов λ < 1000 км (диапазон среднемасштабных ПИВ, регистрируемых GPS) отличие полного уравнения от приближения Хайнса несущественно, тогда как при λ > 5000 км полное уравнение качественно отличается: оно выходит на плато $\hat{\omega} \to \Omega c$, тогда как приближение Хайнса продолжает убывать к нулю. На рис. 1, 2 представлена зависимость собственной частоты от горизонтальной длины волны в диапазоне 10–40 000 км. Выделяются три характерные зоны. Зона 1 (λ < 1 000 км) — гравитационный режим: все три модели совпадают, частота монотонно убывает от N, вращение Земли и сжимаемость пренебрежимо малы. Зона 2 ($\lambda \sim L^R \approx 20\ 000$ км) — зона расхождения: вклады плавучести N и силы Кориолиса f сравниваются. Зона 3 ($\lambda > L^R$) — инерционно-гравитационный режим: полное уравнение выходит на плато $\omega \to F_c = 10^{-4}$ рад/с. Уравнение Хайнса и приближение Буссинеска продолжают убывать к нулю.

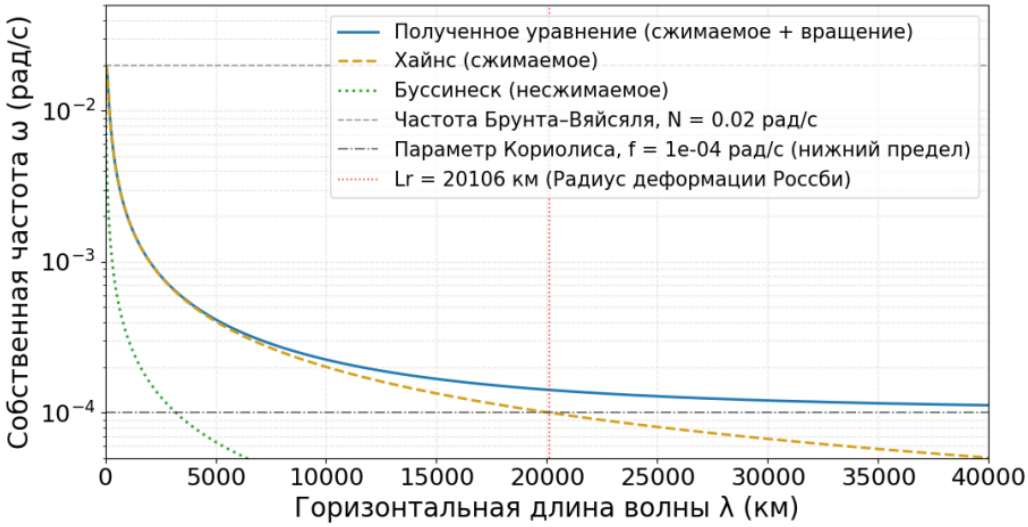

Рис. 1. Аналитическое решение, полученное из линейной теории для максимальной собственной частоты в точке полного внутреннего отражения. Сплошная линия — приближенное решение, полученное из (1), оранжевая штриховая линия — уравнение Хайнса, зеленая пунктирная линия — приближение Буссинеска

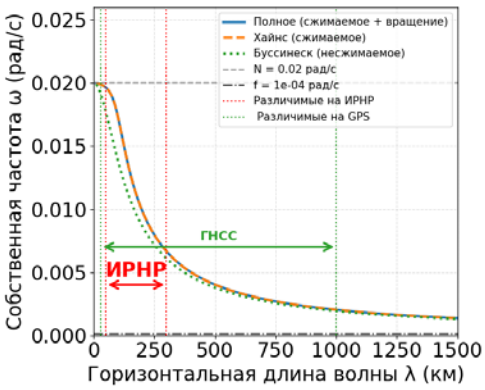

Рис. 2. Аналитическое решение, для максимальной собственной частоты в точке полного внутреннего отражения. Для масштаба 0–1500 км

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АГВ И ВЕТРОВАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ

Для оценки влияния фонового нейтрального ветра на распространение АГВ вычислялась полная плотность волновой энергии E = кинетическая + упругая (акустическая) + термобарическая. В работе используются формула Гаврилова, которая выражает энергию через комплексные амплитуды нормальных мод и применима для монохроматических волн:

$$E = \frac{\rho_0\langle U'^2+W'^2\rangle}{2} + \frac{p'^2}{2\gamma\rho_0} + \frac{g\langle(p'-c_s^2\rho')^2\rangle}{2\gamma\rho_0 b} \qquad (2)$$

где $(V,\ W)$ — скорость возмущения, p' — возмущение давления, ρ' — возмущение плотности; $b = (\gamma-1)g + \frac{c_s^2}{T_0}\frac{\partial T_0}{\partial z}$; $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ — показатель адиабаты.

На рис. 3 показаны полярные диаграммы расчет для которых выполнен для высоты z = 100 км с параметрами атмосферы по модели NRLMSISE-2.1 (01.06.2023, Иркутск, T = 193 К, c_s = 278 м/с). Рассматривался диапазон горизонтальных длин волн λ_h от 100 до 1000 км и три ветровых режима: без ветра, зональный ветер U_0 = 50 м/с, диагональный ветер $U_0 = V_0$ = 50 м/с.

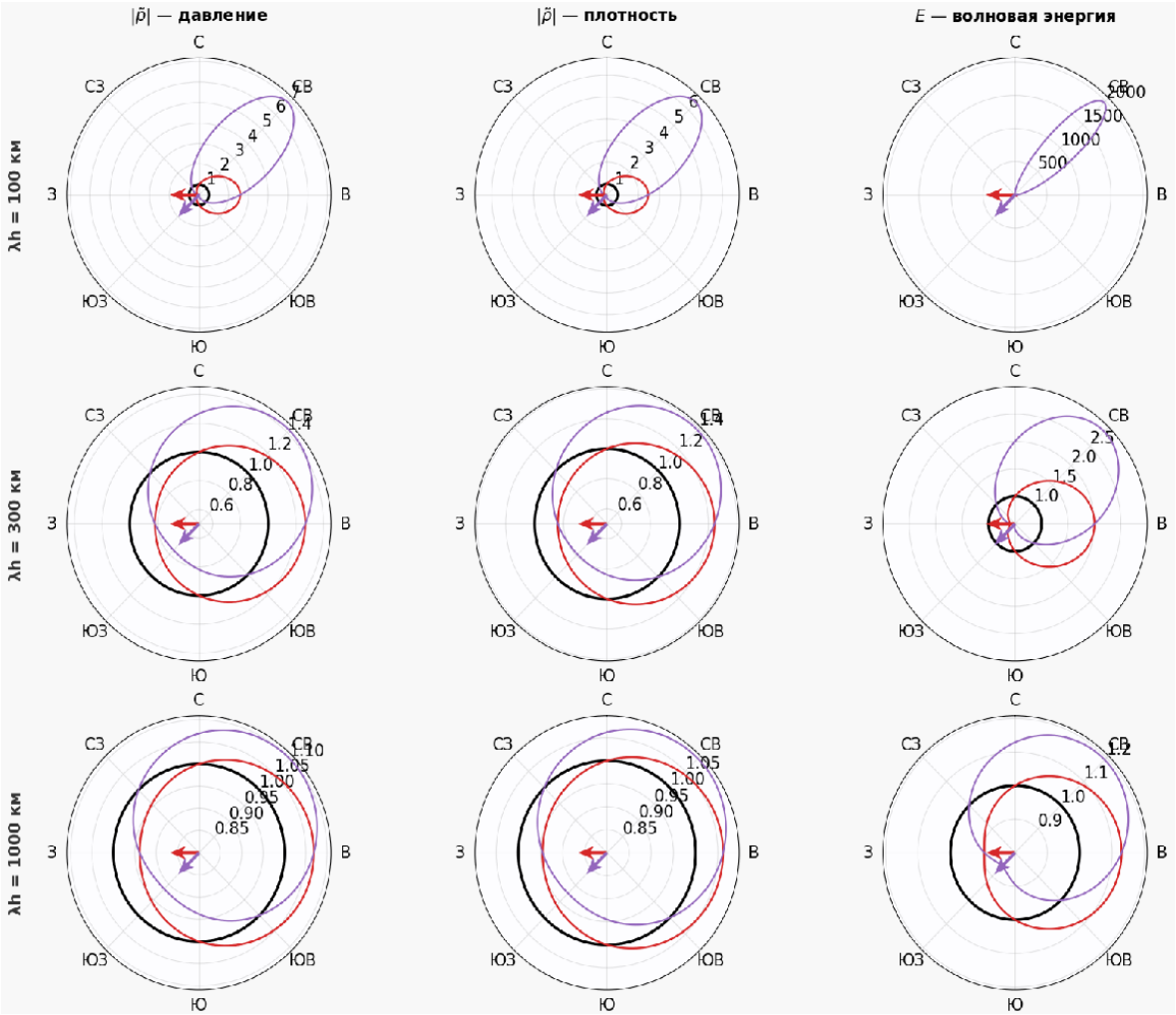

Рис. 3. Полярные диаграммы нормированных амплитуд возмущений давления p, плотности ρ и плотности волновой энергии E как функций азимута распространения φ для таких горизонтальных длин волн λ_h=100, 300, 1000 км. Высота z=100 км, T=193 К, c_s=278 м/с. Черная линия — без ветра, красная — зональный ветер V_0=0, U_0=50 м/с, фиолетовая — диагональный ветер, U_0=V_0=50 м/с

Анализ полярных диаграмм обнаруживает устойчивую закономерность: ветровое воздействие носит ярко выраженный анизотропный характер и существенно зависит от горизонтального масштаба волн. При малых длинах волн ~100 км диаграммы сильно вытянуты: ветер усиливает амплитуды волн, распространяющихся против него, и подавляет волны в попутном направлении вплоть до нуля. При λ_h = 1000 км амплитуды варьируют лишь в узком диапазоне значений — ветровая фильтрация практически не влияет на распределение энергии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выведено полное дисперсионное уравнение АГВ в сжимаемой вращающейся стратифицированной атмосфере, объединяющее приближения Буссинеска, Тейлора—Гольдштейна и Хайнса как частные случаи. Показано, что при масштабах $\lambda < 5000$ км поведение полного уравнения практически совпадает с приближением Хайнса, а принципиальное отличие проявляется лишь при $\lambda > LR \approx 20\ 000$ км — в инерционно-гравитационном режиме. Исследованы энергетические характеристики АГВ на основе формул Гаврилова. Ветровая фильтрация существенна при $\lambda_h < 300$ км: ветер усиливает волны, распространяющиеся против него, и подавляет попутные вплоть до нуля. При $\lambda_h \sim 1000$ км анизотропия пренебрежимо мала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гаврилов Н.М. Распространение внутренних гравитационных волн в стратифицированной атмосфере // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1985. Т. 21, № 10. С. 921–930.

Медведев А.В., Ратовский К.Г., Толстиков М.В. и др. Метод исследования пространственно-временной структуры волновых возмущений в ионосфере // Геомагнетизм и аэрономия. 2009. Т. 49, № 6. С. 812–823.

Fritts D.C., Alexander M.J. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere // Rev. Geophys. 2003. V. 41, N 1. P. 1–64.

Gill A.E. Atmosphere-Ocean Dynamics. New York: Academic Press, 1982. 662 p.

Hocke K., Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982–1995 // Annales Geophysicae. 1996. V. 14. P. 917–940.

Holton J.R., Hakim G.J. An Introduction to Dynamic Meteorology. 5th ed. Amsterdam: Academic Press, 2013. 532 p.

Medvedev A.V., Ratovsky K.G., Tolstikov M.V. et al. Studying of the spatial–temporal structure of wavelike ionospheric disturbances on the base of Irkutsk Incoherent Scatter Radar and digisonde data // J. Atm. Solar-Terr. Phys. 2013. V. 105-106. P. 350–357.