

АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ПРЯМОЙ И ОБРАТНОЙ ЗАДАЧ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ВНУТРЕННИХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН МЕТОДОМ ДОПЛЕРОВСКОГО СДВИГА ЧАСТОТЫ

© 2018 г. В. Ю. Белашов*

Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

*e-mail: vybelashov@yahoo.com

Поступила в редакцию 11.12.2017 г.

После доработки 20.03.2018 г.

Представлено аналитическое решение прямой и обратной задач, возникающих при исследовании динамики внутренних гравитационных волн (ВГВ) методом регистрации доплеровского сдвига частоты. Прямая задача состоит в определении реакции доплеровского сдвига на ВГВ в области точки отражения радиоволны; обратная задача — определение параметров ВГВ по данным доплеровского сдвига частоты. Решения получены в приближении изотермической ионосферы для высот F -области. Они представлены в виде, удобном для их практического использования и могут иметь широкую область применения, включая задачи детектирования солитоноподобных волновых структур в F -области ионосферы.

DOI: 10.1134/S0016794018050024

1. ВВЕДЕНИЕ

При экспериментальных исследованиях динамических процессов в ионосфере различными методами зондирования одной из основных принципиальных проблем является адекватная интерпретация вариаций регистрируемого сигнала. В частности, поскольку сигнал отражает, в большинстве случаев, флуктуации электронной концентрации, связанные с динамикой ионосферных неоднородностей — перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ), возникает задача определения источника, генерирующего такие ПИВ, в качестве которого могут выступать внутренние гравитационные волны (ВГВ) [Брюнелли и Намгаладзе, 1988; Hocke and Schlegel, 1996] и акустико-гравитационные волны (АГВ) [Григорьев, 1999; Нагорский, 1999]; в нейтральной компоненте, возбуждаемые, в свою очередь, источниками импульсного типа различной природы [Belashov, 1989; Белашов, 1990; Перцев и Шалимов, 1996; Drobzheva and Krasnov, 2003; см. также Belashov and Vladimirov, 2005]. Например, такие явления, впервые предсказанные в теоретических работах [Belashov, 1992, 2006; Belashov et al., 2006; Belashova et al., 2007], как генерация двумерных солитонов ВГВ в областях резких градиентов основных ионосферных параметров — на фронтах солнечного терминатора и пятна солнечного затмения, — получили свое качественное подтверждение в экспериментах по ионосферному зондированию [Belashov and Pod-

delsky, 1992; Galushko et al., 2007; Nasyrov et al., 2016; Насыров и др., 2017]. Однако, как известно, прямых методов измерения динамических параметров нейтральной компоненты, т.е. характеристик ВГВ, на высотах ионосферы не существует. В связи с этим, задача вычисления по измеренным данным количественных динамических характеристик ВГВ, определенно, остается актуальной до настоящего времени.

Рассмотрим здесь обозначенную выше проблему на примере одного из наиболее эффективных (с точки зрения исследования динамических процессов) методов зондирования ионосферы — метода регистрации доплеровского сдвига частоты (ДСЧ) отраженного зондирующего импульса. Заметим при этом, что в исследованиях ВГВ методом ДСЧ сосуществуют и взаимно дополняют друг друга задачи двух типов:

— исследование реакции ДСЧ на ВГВ с а priori известными параметрами (например, при известном или моделируемом механизме возбуждения ВГВ) — прямая задача, и

— интерпретация регистрируемых ВГВ в терминах волновых возмущений нейтральной компоненты — обратная задача.

В настоящей работе аналитически рассмотрены задачи обоих типов и получены их решения в виде, удобном для практического использования. В отличие от работы [Савельев, 1987], где впервые была поставлена задача восстановления поля

скорости нейтральной компоненты плазмы по ДСЧ, мы не будем здесь вводить ограничения на пространственные размеры возмущений и рассмотрим вариации ДСЧ для ВГВ, перемещающихся под малыми углами к горизонтали.

2. ПРЯМАЯ И ОБРАТНАЯ ЗАДАЧИ

В изотропном случае возмущение фазы зондирующей радиоволны $\delta\varphi = -(\omega/c)\int_L \delta n dl$ приводит к доплеровскому сдвигу частоты

$$\omega_D = -\frac{\omega}{c} \int_L \frac{dn}{dN} \frac{\partial}{\partial t} \delta N dl, \quad (1)$$

где $n = \sqrt{1 - N/N_\omega}$ – показатель преломления; N и δN – электронная концентрация и ее возмущение. Рассматривая область F ионосферы, где в нейтральном и ионном составе преобладающими являются атом и ион кислорода соответственно, запишем уравнение непрерывности для N в виде [Белашов, 1990]:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\frac{\partial N}{\partial z} + \frac{N}{2H_i} \right) D_0 e^{z/H_i} - u_z (1 - e^{-vt'}) \right] N \sin I \cos I - \beta N + Q, \quad (2)$$

где u_z – вертикальная составляющая скорости нейтральных частиц; v – константа задержки в возмущении ионизованной компоненты относительно нейтральной; $t' = t - t_0$, t_0 – время начала возмущения в нейтральной компоненте; H_i – высота однородной атмосферы для ионов; I – магнитное наклонение; $D_0 \exp(z/H_i) = D_\alpha \sin^2 I$, D_α – коэффициент амбиполярной диффузии; $\beta = \beta_0 \exp(-Pz/H_i)$ и Q – соответственно коэффициент рекомбинации и скорость ионообразования.

Аппроксимируя профиль концентрации заряженных частиц в окрестности точки отражения экспонентой $N = N_0 \exp(z/H_i)$ и интегрируя правую часть выражения (1) с учетом (2) в пределах от $z = H_i$ до $z = 0$, для доплеровского сдвига частоты получим

$$\omega_D = \left[\beta H_i - \left(3 \frac{D_0}{H_i} + \frac{H_i}{N_0} Q \right) e^{-z/H_i} \right] \Delta k_z + H_i (1 - e^{-vt'}) \frac{\sin 2I}{2} \left(\frac{1}{2H} + \frac{1}{H_i} \right) \int_L u_z dk_z, \quad (3)$$

где $z = h - h_0$; $\Delta k_z = -2(\omega/c) \cos \theta \sqrt{1 - N(z)/N_0}$, θ – угол между волновым вектором и вертикалью на уровне z . Интеграл в правой части (3) может быть

вычислен с помощью асимптотического разложения в ряд Тейлора при $H_i \rightarrow 0$:

$$\int_L u_z dk_z \approx \int_{-H_i}^0 \left[u_z(\mathbf{r}_0) + (\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) \frac{\partial u_z}{\partial \mathbf{r}_0} \right] dk_z(z) = u_z(0) \Delta k_z \left(1 + \frac{\langle z \rangle}{2H} \right),$$

где $\langle z \rangle \approx -0.258 H_i$; $\Delta k_z \approx -1.59(\omega/c) \cos \theta$; $u_z(0) = u_z(x, y, t)|_{z=0}$. Тогда, вводя $q = Q/\beta N$, из (3) на уровне $z = 0$, соответствующем точке отражения, получим

$$\omega_D = H_i \Delta k_z \left[\beta(1 - q) - 3 \frac{D_0}{H_i^2} + \frac{\sin 2I}{2} \left(\frac{1}{2H} + \frac{1}{H_i} \right) \left(1 - 0.129 \frac{H_i}{H} \right) u_z(0) (1 - e^{-vt'}) \right]. \quad (4)$$

Выражение (4) есть решение сформулированной выше прямой задачи. Обращая формулы (3), (4), легко найдем u_z как функцию ω_D для решения обратной задачи.

Выпишем решения прямой и обратной задач в случае $T_e = T_i$:

$$\omega_D = 2\Delta k_z \left[\beta H(1 - q) - 0.75 \frac{D_0}{H} + 0.371 \sin 2I u_z (1 - e^{-vt'}) \right], \quad (5)$$

$$u_z = \frac{0.5\omega_D/\Delta k_z + 0.75D_0/H - \beta H(1 - q)}{0.371 \sin 2I [1 - \exp(-vt')]}.$$

Заметим, что в околополуденное время, когда процессы ионизации и рекомбинации в ионосфере примерно уравниваются друг друга, т.е. $q \cong 1$, выражения (5) становятся еще более простыми. В ночных условиях ионообразование почти отсутствует и $q = 0$.

Результаты расчетов по формуле (4) для условий в F -области ионосферы, соответствующих реальным, когда $T_e = T_i$ [справедливы решения (5)], $\Delta k_z = -5.3 \times 10^{-2} \text{ м}^{-1}$, $\theta = 0$ (вертикальное зондирование), $I = 63.4^\circ$ (район магнитной широты $\varphi_m = 45^\circ$), $\beta_0 = 3.1 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$, $D_0 = 3.1 \times 10^5 \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$, $q = 0$ (ночь), и когда u_z является двумерным солитонным решением полученного Belashov [1989; см. также Belashov and Vladimirov, 2005] обобщенного уравнения Кадомцева–Петвиашвили (ОКП) для верхней атмосферы, представлены на рисунке.

Заметим, что вариации ω_D такого типа неоднократно наблюдались в многочисленных экспериментах по доплеровскому зондированию ионосферы, что, учитывая результаты настоящей работы, можно интерпретировать как эффект,

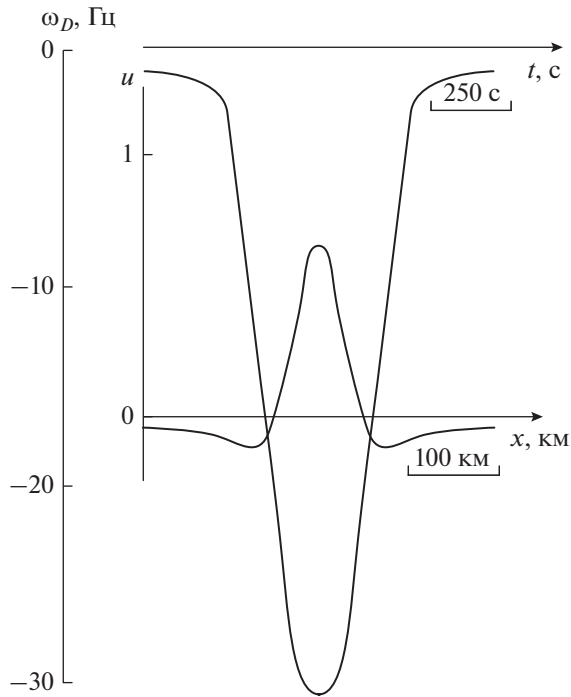


Рис. 1. Профиль $u = u_z / \sqrt{gH}$ для солитона ВГВ уравнения КП для верхней атмосферы и соответствующая ему вариация ДСЧ.

вызываемый в F -области перемещающимися уединенными структурами – двумерными солитонами ВГВ.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные решения прямой и обратной задач наглядны и достаточно удобны для практического использования в задачах, связанных с идентификацией ВГВ-возмущений в записях регистрируемого сигнала ДСЧ при ионосферном доплеровском зондировании ионосферы. Такое представление взаимосвязи ДСЧ и вертикальной компоненты скорости нейтральных частиц удобно тем, что при решении прямой задачи для вычисления доплеровского сдвига нет необходимости предварительно восстанавливать профиль электронной концентрации по полю скорости возмущения. При решении же обратной задачи мы можем сразу восстановить поле скорости нейтральной компоненты по записям доплеровского смещения – непосредственно из доплерограммы. Представленный частный пример наглядно иллюстрирует практическую значимость полученных результатов в исследованиях ВГВ методом ДСЧ.

Полученные результаты, в частности, актуальны при решении задач детектирования в F -области солитоноподобных волновых “предвестников”, генерируемых в областях резких градиентов

основных ионосферных параметров при движении пятна солнечного затмения и солнечного терминатора [Belashova et al., 2007; Belashov and Belashova, 2015] и наблюдаемых в многочисленных экспериментах по зондированию ионосферы [Belashov and Poddelsky, 1992; Galushko et al., 2007; Nasyrov et al., 2016; Насыров и др., 2017]. Результаты также могут оказаться полезными при решении задач, связанных с импульсным воздействием на ионосферу таких источников, как сейсмические события [Перцев и Шалимов, 1996] и наземные искусственные взрывы [Drobzheva and Krasnov, 2003].

Настоящая работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Белашов В.Ю.* Динамика нелинейных внутренних гравитационных волн на высотах F -области ионосферы // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 30. № 4. С. 637–641. 1990.
- *Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А.* Физика ионосферы. М.: Наука. 528 с. 1988.
- *Григорьев Г.И.* Акустико-гравитационные волны в атмосфере Земли // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 42. № 1. С. 3–25. 1999.
- *Нагорский П.М.* Анализ отклика КВ-радиосигнала на возмущения ионосферной плазмы, вызванные ударно-акустическими волнами // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 42. №1. С. 36–44. 1999.
- *Насыров И.А., Когогин Д.А., Шиндин А.В., Грач С.М., Шербоев М.А.* Исследования нелинейных волновых структур в ионосфере, стимулированных солнечным терминатором и мощным радиоизлучением стенда “Сура” // XII ежегод. конф. “Физика плазмы в Солнечной системе”, 6–10 февраля 2017. М.: ИКИ РАН. С. 30. 2017.
- *Перцев Н.Н., Шалимов С.Л.* Генерация атмосферных гравитационных волн в сейсмически активном регионе и их влияние на ионосферу // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 36. № 2. С. 111–118. 1996.
- *Савельев В.Л.* О восстановлении поля скорости нейтрального компонента ионосферной плазмы по доплеровскому сдвигу частоты // Волновые возмущения в ионосфере. Алма-Ата: Наука. С. 60–66. 1987.
- *Belashov V.Yu.* Solitary electron density waves induced by the IGW’s solitons in the ionosphere // Proc. 1989 Int. Symp. on EMC, Nagoya, Japan, Sept. 8–10, 1989. New York: IEEE, Inc. V. 1. P. 64–67. 1989.
- *Belashov V.Yu.* The solar terminator front-induced wave disturbances in the ionosphere F layer // Proc. 1992 Int. Symp. on EMC, Beijing, China. P. 141. 1992.
- *Belashov V.Yu., Poddelsky I.N.* The complex experimental investigations of the F layer’s inhomogeneous structure in the region of solar terminator front // Proc. 1992 Int. Symp. on EMC, Beijing, China. P. 145. 1992.

- *Belashov V.Yu., Vladimirov S.V.* Solitary waves in dispersive complex media. Theory, simulation, applications. Berlin-Heidelberg-New York-Tokyo: Springer-Verlag, 305 p. 2005.
- *Belashov V.Yu., Belashova E.S., Vladimirov S.V.* Dynamics of IGW and traveling ionospheric disturbances in regions with sharp gradients of the ionospheric parameters // Australian Institute of Physics 17th National Congress 2006, December 3–8. Australian Institute of Physics, Brisbane, Queensland, Australia. Referreed Papers. Paper No. WC0111. 5 p. 2006.
- *Belashov V.Yu., Belashova E.S.* Dynamics of IGW and traveling ionospheric disturbances in regions with sharp gradients of the ionospheric parameters // Adv. Space Res. V. 56. P. 333–340. 2015.
- *Belashova E.S., Belashov V.Yu., Vladimirov S.V.* Structure and evolution of IGW and TID in regions with sharp gradients of the ionospheric parameters // J. Geophys. Res. V. 112. A07302. 2007.
- *Drobzheva Ya.V., Krasnov V.M.* The acoustic field in the atmosphere and ionosphere caused by a point explosion on the ground // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 65. № 3. P. 369–377. 2003.
- *Galushko V.G., Kashcheyev A.S., Kashcheyev S.B., Koloskov A.V., Pikulik I.I., Yampolski Y.M., Litvinov V.A., Milinevsky G.P., Rakusa-Suszczewski S.* Bistatic HF diagnostics of TIDs over the Antarctic Peninsula // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 69. P. 403–410. 2007.
- *Hocke K., Schlegel K.* A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982–1995 // Ann. Geophysicae. V. 14. № 9. P. 917–940. 1996.
- *Nasyrov I.A., Kogogin D.A., Shindin A.V., Grach S.M., Zagretdinov R.V.* The measurement of the ionospheric total content variations caused by a powerful radio emission of “Sura” facility on a network of GNSS-receivers // Adv. Space Res. V. 57. P. 1015–1020. 2016.