

УДК 621.371.25

## ОБ ИСТОЧНИКЕ ГЕНЕРАЦИИ ВНУТРЕННИХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В ЗАТЕНЕННОЙ ИОНОСФЕРЕ

*В. В. Куликов, В. М. Шашунькина, Л. А. Юдович*

На основе аналитического решения уравнения непрерывности для электронной концентрации слоя  $F2$  рассчитаны вариации основных параметров слоя  $F2$  — максимальной электронной концентрации ( $N_m F2$ ) и высоты ее максимума ( $h_m F2$ ) при прохождении внутренних гравитационных волн (ВГВ) в периоды магнитосферных суббурь. Вариации скорости и давления нейтрального газа, необходимые для расчетов, были получены из аналитического решения линеаризованных уравнений гидродинамики с силовым и тепловым источниками в приближении двухструйной авроральной токовой системы. Полученные экспериментально из ионосферных данных вариации  $N_m F2$  и  $h_m F2$ , характеризующие ионосферный эффект магнитосферной суббури, обусловленный прохождением ВГВ, находятся во вполне удовлетворительном согласии с расчетными величинами.

Известно, что одним из возможных источников перемещающихся возмущений являются авроральные электроструи, которые значительно усиливаются в периоды магнитосферных суббурь, и что основными механизмами генерации внутренних гравитационных волн (ВГВ) являются воздействие пондеромоторной силы на окружающую нейтральную среду, а также диссипация токов [1-3].

Поскольку в настоящей статье рассматривается генерация ВГВ в затененной ионосфере, здесь будет подробно рассмотрена суббуря 7. X. 1968 г., приходящаяся на вечерне-ночные часы местного времени для долгот территории Советского Союза.

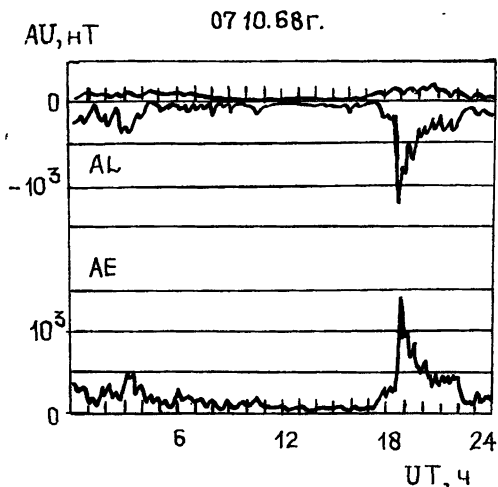


Рис. 1.

На рис. 1 представлены вариации параметров авроральной активности:  $AU$ -,  $AL$ -,  $AE$ - индексы для этой суббури по мировому времени. Суббуря 7.X.1968 г. началась около 17<sup>h</sup> UT усилением восточной элек-

тросструи и к 20<sup>h</sup>40<sup>m</sup> UT  $AU$  достигло примерно 200  $nT$ . Западная электроструя начинает увеличиваться с 17<sup>h</sup>30<sup>m</sup> UT и  $AL$  достигает 200  $nT$  к 18<sup>h</sup>40<sup>m</sup> UT, затем происходит резкое увеличение  $AL$  и в 19<sup>h</sup> UT  $AL \sim 1200$   $nT$ . Таким образом, до 18<sup>h</sup>20<sup>m</sup> UT вариации индексов магнитной активности ( $AU$ ,  $AL$  и  $AE = |AU| + |AL|$ ) характеризуют фазу зарождения суббури, а фаза развития суббури весьма непродолжительна и заканчивается около 19<sup>h</sup> UT. После чего начинается фаза восстановления, когда  $AL$  в течение двух часов уменьшается до 200  $nT$ .

Из анализа вариаций магнитного поля по цепочке высокоширотных обсерваторий получено, что западная электроструя в течение этой суббури располагалась в позднем вечернем секторе на широте  $\Phi > 65^\circ$ , в полуденном — на  $\Phi \sim 68^\circ$  и в раннем утреннем секторе — на  $\Phi < 65^\circ$ , восточная электроструя располагалась в вечернем секторе на  $\Phi < 65^\circ$ .

Реакция ионосферы на прохождение ВГВ, генерируемых во время суббурь, в ночные часы проявляется в подъеме (или опускании) всего слоя  $F_2$  при небольшом понижении критических частот  $f_oF_2$  [5].

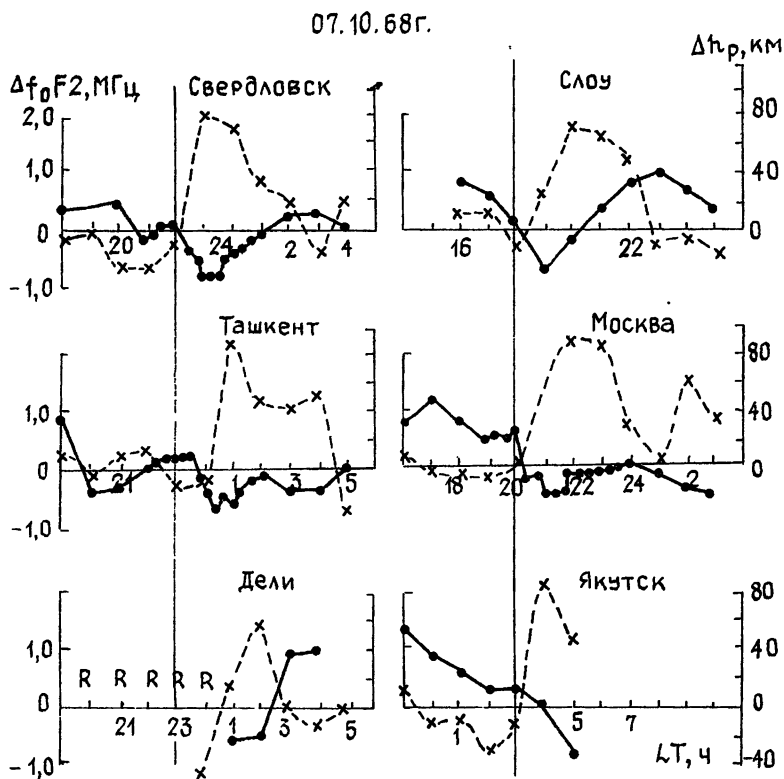


Рис. 2.

На рис. 2 приведены вариации параметров ионосферы в течение суббури 7.X.1968 г.: отклонения от медианы критических частот  $\Delta f_oF_2$  (непрерывные линии) и высот  $\Delta h_p$  или  $\Delta h'F$  (штриховые линии). Следует отметить, что при спокойном состоянии магнитного поля вариации ионосферных параметров близки к норме и отклонения высот составляют  $\Delta h \approx \pm 5 \div 10$  км. В течение суббури, которая началась в 18<sup>h</sup>30<sup>m</sup> UT (на рисунке момент 18<sup>h</sup> UT отмечен вертикальной линией), состояние ионосферы меняется: в течение первых 1—2 часов резко возрастает высота максимума слоя  $F_2$ , на 80—100 км выше нормального уровня, а ионизация в максимуме слоя понижается на  $\Delta f_oF \approx$

$\approx 0,5 \div 0,7$  МГц. На рисунке приведены станции в порядке убывания геомагнитной широты и хорошо видно, что распространение возмущения происходит от высоких широт и запаздывание эффекта увеличивается с уменьшением широты станции (так, например, для линии Свердловск — Ташкент запаздывание  $\Delta t = 1$  ч.). Скорость распространения возмущения, определенная по этому запаздыванию с использованием 15-минутных данных для  $\Delta f_0 F2$ , составляет  $v \sim 650 \div 700$  м/с, что находится в соответствии с данными ранее исследуемых суббурь, приходящихся на затененные часы [6].

Как уже отмечалось [6], ВГВ генерируются авроральными струями и фронт распространения возмущения в ионосфере примерно параллелен зоне аврорального овала. Основные периоды колебаний токов в струях согласно спектральному анализу данных, приведенных на рис. 1, находились в интервале 40—60 мин, что в дальнейшем и использовалось в расчетах в качестве частоты ВГВ. Для случая этой суббури эффект наблюдался примерно одновременно на одной геомагнитной широте  $\Phi \sim 50^\circ N$  (Слоу, Москва, Свердловск, Якутск) в диапазоне долгот  $\Delta \lambda \sim 135^\circ E$ , т. е. во всей затененной ионосфере. На высокоширотных станциях ( $\Phi > 55^\circ N$ ) определение ионосферных параметров затруднено из-за поглощения, диффузности, на низкоширотных станциях Дели ( $\Phi \sim 18^\circ$ ) и Кодайканал ( $\Phi \sim 0,5^\circ$ ) эффект наблюдается четко.

Таким образом, во время рассматриваемой суббури во всей затененной ионосфере от высоких широт вплоть до экватора наблюдаются значительные изменения ионосферных параметров, продолжительность которых линейно увеличивается от области генерации [5] и на средних и низких широтах составляет 3—4 часа. Эти изменения могут оказывать существенное влияние на условия распространения радиоволн, поэтому с помощью теории ВГВ желательно иметь возможность оценить эти изменения в ионосфере в периоды суббурь. В [7] получено аналитическое решение линеаризованных уравнений гидродинамики в плоскостной изотермической атмосфере, описывающее генерацию ВГВ системой, состоящей из двух авроральных электроструй. Основными измеренными возмущенными параметрами  $F$ -области ионосферы являются высота максимума электронной концентрации слоя  $F2 (h_m F2)$  и максимальное значение концентрации электронов ( $N_m F2$ )  $N_m = 1,24 (f_0 F2)^2 \cdot 10^4$  эл/см<sup>3</sup>, где  $f_0 F2$  — в МГц.

В работах [8, 9] исследовано влияние прохождения ВГВ на ионосферу, там представлены формулы, которые весьма громоздки и неудобны для расчета, однако в [7] получены элементарные формулы, которые при этом находятся в пределах обычной точности экспериментальных данных.

Выражения, описывающие вариации нейтральной атмосферы при прохождении ВГВ, в соответствии с [10] имеют вид

$$F(r, t) = \frac{1}{8\pi^2 c_s^2 r} \int_0^\infty \frac{S(k, \omega) \exp\{i[r\xi(\omega) - \omega t]\}}{[(\omega^2 - \omega_g^2)(\omega^2 - \omega_c^2)]^{1/2}} d\omega, \quad (1)$$

где  $S(k, \omega)$  — фурье-образ функции источника,  $\xi(\omega) = (1/c_s) [(\omega^2 - \omega_g^2)(\omega^2 - \omega_c^2)/(\omega^2 - \omega_g^2)]^{1/2}$ ,  $F(r, t)$  — отклик ионосферы, а волновой вектор  $k$  находится из соотношений

$$k_\perp^2 = k_x^2 + k_y^2 = \frac{\omega^2 - \omega_a^2}{c_s^2} \frac{\omega^4 \sin^2 \theta}{(\omega^2 - \omega_g^2)(\omega^2 - \omega_c^2)}, \quad (2)$$

$$k_z^2 = \frac{\omega^2 - \omega_g^2}{c_s^2} \frac{(\omega^2 - \omega_a^2) \cos^2 \theta}{(\omega^2 - \omega_c^2)},$$

$$k_y/k_x = \operatorname{tg} \varphi, \quad \omega_a = c_s/2H, \quad \omega_c = \omega_g \cos \theta,$$

где  $r, \theta, \varphi$  — сферические координаты точки наблюдения,  $x, y, z$  — декартовы координаты точки наблюдения,  $\omega$  — частота ВГВ, которая определяется на широтах авроральной зоны (область генерации),  $\omega_g$  — частота Вайсиля — Брандта,  $H$  — шкала высот однородной атмосферы,  $c_s$  — скорость звука.

Рассматривается случай источника, гармонически меняющегося во времени. Компоненты скорости ветра во внутренней гравитационной волне в соответствии с [7] определяются из следующих выражений:

а) пондеромоторный источник —

$$v_{xn} = \frac{k_{\perp} I H_3 e^{-z/2H}}{4\pi c r \rho_0 \omega} \sqrt{\frac{\omega^2 - \omega_g^2}{\omega^2 - \omega_c^2}} \Psi_1(k_{\perp} R) \exp[i(r\xi(\omega) - \omega t)], \quad (3)$$

$$v_{zn} = \frac{\omega \{k_z + i[(\omega_a/\gamma c_s)(\gamma - 2)]\} I H_3 e^{-z/2H}}{4\pi c \rho_0 r [(\omega^2 - \omega_g^2)(\omega^2 - \omega_c^2)]^{1/2}} \Psi_1(k_{\perp} R) \exp[i(r\xi - \omega t)];$$

б) тепловой источник —

$$v_{xt} = -\frac{ik_{\perp} I^2 e^{-z/2H} (\omega^2 - g/2H + igk_z)}{4\pi c_s^2 \rho_0 r \sigma [(\omega^2 - \omega_g^2)(\omega^2 - \omega_c^2)]^{1/2}} \Psi_2(k_{\perp} R) \exp[i(r\xi - \omega t)], \quad (4)$$

$$v_{zt} = -\frac{i\omega I^2 e^{-z/2H} (\omega^2 - g/2H + igk_z) [k_z + i(\omega_a/\gamma c_s)(\gamma - 2)]}{4\pi c_s^2 \rho_0 r \sigma [(\omega^2 - \omega_g^2)(\omega^2 - \omega_c^2)]^{1/2}} \times \\ \times \Psi_2(k_{\perp} R) \exp[i(r\xi - \omega t)].$$

Здесь  $H_3$  — напряженность магнитного поля Земли,  $\sigma$  — интегральная проводимость в авроральном овале,  $I$  — интегральный авроральный ток,  $\rho_0$  — плотность нейтральной невозмущенной атмосферы,  $c$  — скорость света,  $\gamma$  — отношение удельных теплоемкостей,

$$\Psi_1 = \left\{ \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} - \int_{\alpha_3}^{\alpha_4} \right\} (1 + k_{\perp} R \cos \varphi) \exp(-ik_{\perp} R \cos \varphi) d\varphi, \quad (5)$$

$$\Psi_2 = \left\{ \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} + \int_{\alpha_3}^{\alpha_4} \right\} \exp(-ik_{\perp} R \cos \varphi) d\varphi,$$

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  есть границы восточной и западной электроструй соответственно, причем токи в струях считаются равными,  $R$  — радиус токового кольца. Используя эти выражения, нетрудно получить формулы вариаций параметров слоя  $F_2$  [9]. Из уравнения непрерывности для электронов (с учетом амбиполярной диффузии) в [9, 10] получен общий вид решения при возмущении нейтральным ветром:

$$\delta N = v_n (k_n N_0 - in_z \partial N_0 / \partial z) (\omega + iD_a k_n^2)^{-1}, \quad (6)$$

где

$$v_n = (\mathbf{v} \cdot \mathbf{B})/|B_3|, \quad k_n = (\mathbf{k} \cdot \mathbf{B}_3)/|B_3|, \quad \mathbf{v} = \{v_x, v_z\},$$

$$v_x = v_{xn} + v_{xt}, \quad v_z = v_{zn} + v_{zt},$$

$v_n$  и  $k_n$  — соответственно проекции скорости ветра  $\mathbf{v}$  в волне и волнового вектора  $\mathbf{k}$  на направление магнитного поля Земли в точке наблюдения,  $\delta N$  — вариация концентрации электронов,  $B_3$  — индукция маг-

нитного поля Земли,  $\rho_0$  — стационарная концентрация в отсутствие возмущения,  $D_a$  — коэффициент амбиполярной диффузии,  $n_z$  — проекция единичного орта вдоль магнитного поля на оси  $z$ .

В соответствии с используемым линейным приближением полагается, что как стационарный, так и возмущенный профиль концентрации электронов описывается параболой

$$N_0 = N_m [1 - ((z - z_m)/z_0)^2], \quad (7)$$

где  $N_m$  — концентрация электронов в максимуме слоя,  $z_m$  — высота максимума концентрации,  $z_0$  — полуширина параболического слоя.

Подставляя последнюю формулу (7) в выражение для скорости ветра, входящее в решение уравнения непрерывности, и пренебрегая членами со степенью по  $z$  выше второй, получаем выражения для вариаций параболического слоя. Так, вариация концентрации электронов в максимуме

$$\delta N_m = v_n k_n N_0 / (1 + i D_a k_n^2); \quad (8)$$

высота максимума концентрации слоя

$$Z_m = -(z_0^2 k_n k_F + i 2 n_z) (z_0^2 k_n k_F^2 + 4 n_z k_F - 2 k_n - C v_n^{-1})^{-1}, \quad (9)$$

где  $z_0$  — полуширина невозмущенного слоя,  $k_F = 1/2H + ik_z$ ,  $C = (\omega + i D_a k_n^2) \exp(-k_F z)$ .

Следует отметить, что, в силу положенной в основу линейности приближений, эти формулы пригодны не только для гармонического во времени источника, но и для источника в виде импульсов [7]. Полученные выражения (3), (4), (8), (9) использовались при оценках вариаций параметров слоя  $F_2$  для рассмотренной выше суббури 7.X.1968 г. Абсолютные максимальные величины токов в авроральных электроструях определялись независимо как с использованием эмпирически полученной в работе [11] корреляции между значением  $AE$ -индекса и авроральными токами, так и с привлечением данных магнитных станций, расположенных вблизи аврорального овала. В последнем случае для оценок величин токов использовались элементарные формулы, следующие из закона Био—Савара:

$$I = 2\pi \Delta H (h^2 - a^2)/h, \quad I = 2\pi \Delta Z (h^2 + a^2)/a, \quad (10)$$

где  $\Delta H$  и  $\Delta Z$  — вариации горизонтальной и вертикальной составляющих магнитного поля Земли соответственно,  $h$  — высота тока над поверхностью Земли,  $a$  — расстояние от магнитной обсерватории до токовой струи.

С другой стороны, экспериментальные данные, приведенные в [11], позволяют зависимость между авроральным током и  $AE$ -индексом приблизительно представить следующим выражением:  $I = 0,95 \cdot 10^3 AE$ . Значения токов, вычисленных по [11] с использованием значений  $AE$  и с помощью  $\Delta H$  и  $\Delta Z$  на станциях вблизи аврорального овала в полуденном секторе, составили для данной суббури  $1,3 \cdot 10^6$  А и  $1,2 \cdot 10^6$  А соответственно. Для этой суббури получилось довольно удовлетворительное соответствие вычисленных разными методами токов в электроструях.

Далее для расчетов необходимо знать расположение электроструй. Стыки восточной и западной электроструй располагаются в долготных областях около  $11^{\text{h}}00^{\text{m}}$  и  $21^{\text{h}}00^{\text{m}}$  LT. Вклад джоулева механизма генерации ВГВ определяется интегральной проводимостью в области, где протекают авроральные электроструи. Величина проводимости принималась равной  $30-40 \text{ Ом}^{-1}$ . Радиус токового кольца определялся по

местоположению авроральных электроструй. Коэффициент амбиполярной диффузии принимался равным  $D_a \sim 2 \cdot 10^6$  м/с согласно [12]. Невозможные значения  $\rho_0$  и  $H$  на высоте наблюдения ( $z_m \approx 300$  км) были взяты из модели нейтральной атмосферы Яккия-77. Спокойные значения  $N_0 = 6,2 \cdot 10^5$  эл/см<sup>3</sup> брались из экспериментальных данных ВЗ на станции Москва 7.X.1968 г.

Таблица 1

$\Delta z_m, \text{км}$	$\Delta N/N_m, \%$
Теория	
70—80	17—20
Эксперимент	
60—100	20—25

Рассчитанные значения вариаций основных параметров слоя  $F$  ионосферы (отклонения высот максимума  $\Delta z_m$  и электронной концентрации  $\Delta N_m$ ), вызванные прохождением ВГВ для широты  $50^\circ \text{N}$  и сопоставленные с экспериментальными значениями, приведены в табл. 1.

Таким образом, зная положение электроструй и значение токов в них, можно вычислить отклонения ионосферных параметров при прохождении ВГВ во время суббури.

Авторы выражают благодарность Г. И. Григорьеву за плодотворное обсуждение работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьев Г. И., Докучаев В. П. — Геомагнетизм и аэрономия, 1969, 9, № 4, с. 650.
2. Chimonas G., Hines C. O. — Planet. Space Sci., 1970, 18, № 4, p. 565.
3. Куликов В. В., Шашунькина В. М., Юдович Л. А. — Изв. вузов — Радиофизика, 1980, 23, № 9, с. 1015.
4. Куликов В. В. — Геомагнетизм и аэрономия, 1982, 22, № 1, с. 45.
5. Шашунькина В. М., Юдович Л. А. В кн.: Ионосферные исследования. — М.: Радио и связь, 1983, № 33, с. 66.
6. Куликов В. В., Шашунькина В. М., Юдович Л. А. В кн.: Практические аспекты изучения ионосферы и ионосферного распространения радиоволн. — М.: АН СССР, 1981, с. 69.
7. Куликов В. В. — Геомагнетизм и аэрономия, 1982, 22, № 1, с. 45.
8. Volland H., Neuton G. P., Pelz D. T. — J. Geophys. Res., 1969, 74, № 1, p. 183.
9. Porter N. S., Tuan T. F. — J. Atm. Terr. Phys., 1974, 36, № 1, p. 135.
10. Liu C. H., Yeh K. C. — Tellus, 1971, 23, № 2, p. 150.
11. Akasofu S.-I., Kamide Y. — Planet. Space Sci., 1976, 24, № 3, p. 223.
12. Yeh K. C., Liu C. H. — Rev. Geophys. Space Phys., 1974, 12, № 2, p. 193.

Институт земного магнетизма,  
ионосферы и распространения  
радиоволн АН СССР

Поступила в редакцию  
23 января 1984 г.

#### ABOUT THE SOURCE OF INTERNAL GRAVITY WAVES INSIDE SHADOWED IONOSPHERE

V. V. Kulikov, V. M. Shashun'kina, L. A. Yudovich

Variations of  $F2$ -layer base parameters under the influence of internal gravity waves (IGW) passing during magnetospheric substorm periods (the electron density maximum ( $N_m F2$ ) and its altitude ( $h_m F2$ )) are calculated on the basis of analytical solution of continuity equation for electron density. It is assumed that IGW generation occurs due to the auroral electrojet dissipation energy. Neutral gas pressure and velocity variations necessary for calculations are found from the analytical solution of the linearized hydrodynamic equations with force and heat source in the approximation of double-jet auroral current system. Variations of  $N_m F2$  and  $h_m F2$  which characterize ionospheric effect of IGW passing during the magnetospheric substorm were obtained experimentally from ionospheric data and they show the satisfactory agreement with the calculations.