

УДК 621.371.25

ГЕНЕРАЦИЯ ВНУТРЕННИХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В ПЕРИОД МАГНИТНОЙ БУРИ

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

Проведено сравнение экспериментальных данных с аналитическим расчетом для перемещающегося ионосферного возмущения в период магнитной бури 25 мая 1967 г. Возмущение ассоциировалось с внутренними гравитационными волнами, возбуждаемыми пондеромоторными силами, возникающими за счет токов в авроральной электроосфере. Расчеты амплитуды, скорости перемещения возмущения и волнового вектора волны дают удовлетворительное согласие с измерениями, полученными как на станциях вертикального зондирования ионосферы, так и по спутниковым данным

Известно, что в авроральной области в период магнитосферных возмущений происходит генерация внутренних гравитационных волн (ВГВ), отождествляемых с перемещающимися ионосферными возмущениями (ПИВ), которые затем распространяются к более низким широтам [1-6]. Одним из возможных источников генерации (ВГВ) является энергия, диссипируемая в авроральной электроосфере.

На примере магнитной бури 25 мая 1967 г. по данным вертикального зондирования ионосферы (ВЗ) и измерениям плотности со спутника [7, 8] рассматриваются эффекты ВГВ. На рис. 1 представлены критические частоты слоя F_2 ($f_0 F_2$ в МГц) (светлые кружки) и их медианные значения (темные кружки) для станций в часовых поясах 30—45°Е. Для станции Москва приведены вариации $h_{\max} F_2$, для всех станций — отклонения $h_p F_2$ от медианных значений ($\Delta h_p F_2$) (штриховые линии). В верхней части представлены вариации AE -индекса за этот период. В первой половине дня 25 мая значения AE -индекса ~ 100 нТ, при этом на всех станциях $f_0 F_2$ превышает медианные значения на 1—1,5 МГц. Возрастанию AE до 500 нТ в 10⁰⁰ UT соответствует небольшое понижение в $f_0 F_2$ (0,3 ÷ 0,5 МГц) и подъем в $h_{\max} F_2$ (40 км), но из-за отсутствия данных по ряду станций трудно проследить запаздывание этого возмущения с широтой.

Следующему очень значительному внезапному возрастанию AE до 2300 нТ на всех рассмотренных станциях соответствует понижение в $f_0 F_2$ (1 ÷ 1,5 МГц) и повышение до 150 км в $\Delta h_p F_2$ (в Москве $\Delta h_{\max} F_2 \sim 70$ км). Продолжительность этого эффекта в послеполуденные часы составляет от 1,5 ч на средних широтах до 2,5 ч на низких. Начало резкого понижения и момент минимума $f_0 F_2$ запаздывают с уменьшением широты станции. Примерная скорость горизонтального распространения возмущения, подсчитанная по этому запаздыванию между парами станций, — около 800 м/с, а область генерации ПИВ, определенная по скорости распространения и запаздыванию по отношению к началу суббури, локализована для этого часового пояса на геомагнитных широтах $\Phi \sim 77 \pm 5^\circ$ N.

Анализ данных ВЗ для ночного сектора (Якутск и Южно-Сахалинск) показал, что после первого резкого увеличения AE -индекса магнитной активности в 12³⁶ UT наблюдается значительное увеличение высоты слоя F ионосферы продолжительностью 3—4 часа ($\Delta h_p \sim 130$ км).

Долготный разрез на $\Phi \sim 50^\circ$ N (Москва, Свердловск, Томск, Якутск) с протяженностью по геомагнитной долготе $\Delta \Lambda \sim 75^\circ$ показы-

вает, что возмущение в ионосфере начинается одновременно на всех рассматриваемых станциях и по интенсивности примерно одинаково. Следовательно, область генерации ПИВ расположена в авроральной зоне и вытянута вдоль геомагнитной широты.

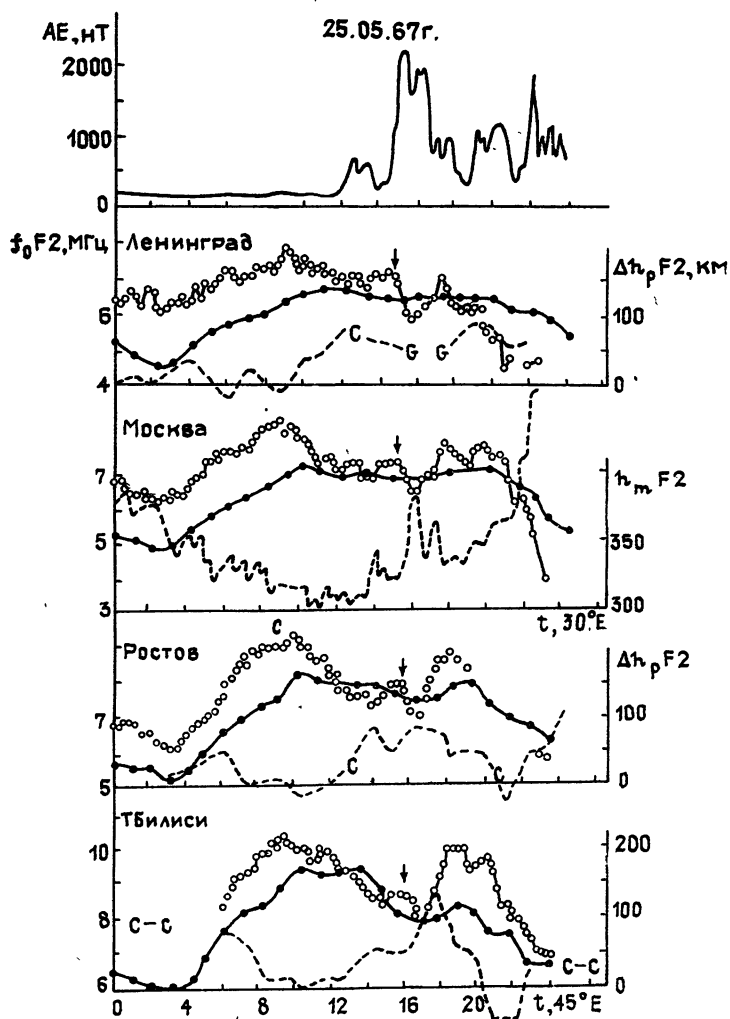


Рис. 1.

В утренние часы, приходящиеся на американский континент, также наблюдается ионосферный эффект после резкого увеличения AE в 12³⁶ UT, причем скорость его распространения — $540 \div 700$ м/с.

Значительные изменения в плотности нейтральной атмосферы от спокойных условий, по данным спутника [7, 8], наблюдаются начиная с 46-й орбиты, соответствующей по времени первому значительному увеличению в AE до 2300 нТ. Эти изменения на высотах полета спутника имеют колебательный характер с амплитудой колебания плотности до 40% от спокойных условий.

Поэтому можно предположить, что 25 мая 1967 г. после 12³⁶ UT во всей северной полушарии происходит генерация ВГВ и наблюдается их распространение к более низким широтам, которое зарегистрировано

наземными станциями ВЗ и спутником с областью генерации, расположенной в кольце, которое примерно совпадает с авроральным овалом, где текут электроджеты.

Оценка изменений параметров атмосферы при прохождении ВГВ производилась с помощью аналитического решения линейризованных уравнений гидродинамики в приближении плоскостной изотермической атмосферы согласно [1]. Линейризованные уравнения гидродинамики решались в цилиндрической системе координат (кривизной земной поверхности пренебрегалось) с центром на геомагнитном полюсе. Источником, возбуждающим ВГВ, считались пондеромоторные силы ($F = \frac{1}{c} [\mathbf{j}(\omega) \times \mathbf{H}_z]$, где $\mathbf{j}(\omega)$ — плотность тока, а \mathbf{H}_z — напряженность магнитного поля Земли), возникающие при прохождении электрических токов в авроральной области. Токвые струи аппроксимировались бесконечно тонким токовым кольцом, расположенным на высоте 110 км от земной поверхности. Плотность тока

$$j_\varphi = \frac{I_0}{2\pi R} \delta(z) \delta(r - R) e^{-i\omega t},$$

$$j_r = j_z = 0,$$

где I_0 — сила тока, r — расстояние от точки наблюдения и R — радиус токового кольца.

Радиус кольца $R \approx 1400$ км, что соответствует $\Phi \approx 77^\circ$ N, был рассчитан по экспериментально измеренным скоростям распространения ПИВ и их запаздыванию относительно начала возмущения в авроральной зоне (т. е. по отношению к моменту резкого роста АЕ-индекса). Амплитуда изменений тока в авроральной области была оценена по амплитуде изменений АЕ-индекса и, согласно [9], составила примерно $2 \cdot 10^6$ А. Расчет производился в приближении гармонического во времени возмущения, причем за период колебаний был принят характерный для аврорального тока в этот интервал времени квазипериод, который составлял около 1 часа. Аналитическое решение, использовавшееся для расчетов переменных составляющих давления (p) и плотности (ρ), имеет вид

$$p = \mu \frac{J_1 \left(\frac{\alpha^2 \beta R}{\eta} \right) \exp \left(-\frac{z}{2H} \right)}{r \eta^2} \exp \left[i \left(\beta r \eta - \omega t - \frac{\pi}{2} \right) \right],$$

$$\rho = -\frac{\alpha^2}{c_s^2} \left[p + \frac{g(\gamma - 1)}{\omega^2} \frac{\partial p}{\partial z} \right],$$

где

$$\mu = \frac{\alpha^2 \beta I_0 H_z}{4\pi c}, \quad \eta = \left(\alpha^2 - \frac{z^2}{r^2} \right)^{1/2}, \quad \alpha^2 = \frac{\omega^2}{\omega_g^2 - \omega^2},$$

$$\omega_g^2 = \frac{(\gamma - 1) g^2}{c_s^2}, \quad \beta^2 = \frac{1}{4H^2} - \frac{\omega^2}{c_s^2}, \quad c_s^2 = \gamma gH, \quad \gamma \approx 1,4.$$

По рассчитанным изменениям плотности и давления была оценена амплитуда колебаний высоты максимума слоя $F2$ в предположении, что максимум слоя колеблется вместе со своей изобарической поверхностью. Затем из дисперсионных соображений оценивались вертикальная и го-

ризонтальная компоненты волнового вектора, по которым рассчитывались компоненты групповой скорости ВГВ, при этом учитывался тот факт, что направление распространения энергии волн совпадает с групповой скоростью, вектор которой нормален к дисперсионной поверхности. Направление распространения энергии есть радиус-вектор \mathbf{r} , проведенный из начала координат в точку наблюдения. Используя эту связь, можно определить вектор \mathbf{k} для данной наблюдаемой частоты ω [10]:

$$\mathbf{k} = k_r \mathbf{e}_r + k_z \mathbf{e}_z,$$

$$k_r^2 = \frac{\omega^4 \sin^2 \theta (\omega^2 - \omega_a^2)}{c_s^2 (\omega^2 - \omega_g^2) (\omega^2 - \omega_g^2 \cos^2 \theta)},$$

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

Имея значения компонент волнового вектора и формулы для компонент групповой скорости, определенные из дисперсионного уравнения, получаем

$$v_r^{(гр)} = \frac{k_r (\omega_a^2 - \omega_g^2) \omega c_s^2}{\omega^4 - k_r^2 \omega_g^2 c_s^2}, \quad v_z^{(гр)} = \frac{k_z \omega^3 c_s^2}{\omega^4 - k_r^2 \omega_g^2 c_s^2}.$$

Невозмущенные значения плотности и давления на высоте наблюдения (максимум слоя $F2$ на высоте 320 км) были взяты из модели нейтральной атмосферы Яккия-77. Рассчитанные амплитуды колебаний сравнивались со спутниковыми измерениями плотности нейтральной атмосферы [7, 8], а также с данными по колебаниям высоты максимума слоя $F2$, полученными из расчетов $n_e(h)$ -профилей по данным ВЗ на станции Москва.

Результаты расчетов и данные измерений приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а

Рассчитываемая величина	Обозначения	Теория	Эксперимент
Амплитуда колебаний плотности	ρ/ρ_0	60%	40 ÷ 50%
Амплитуда колебаний высоты максимума слоя $F2$	$h_m F2/h_{om} F2$	15%	15 ÷ 20%
Групповая скорость:			
Горизонтальная проекция	v_r	650 м/с	600 ÷ 800 м/с
Вертикальная проекция	v_z	32 м/с	не определялась
Длина волны	λ	2500 км	2000 ÷ 3000 км
Волновой вектор:			
Горизонтальная проекция	k_r	$2,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-1}$	$2,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-1}$
Вертикальная проекция	k_z	$2,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-1}$	не определялась

Из таблицы видно, что несмотря на весьма сильные упрощения, сделанные при анализе, результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментом, что подтверждает правильность концепции, положенной в основу интерпретации данного ионосферного возмущения.

Л И Т Е Р А Т У Р А

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. Testud J. — J. Atm. Terr. Phys., 1970, 32, p. 1793
4. Richmond A. D., Matsushita S. — J. Geophys. Res., 1975, 80, p. 2839.
5. Шашунькина В. М. — Геомагнетизм и аэрномия, 1975, 15, с. 359, 936.
6. Гончарова Е. Е., Климов Н. Н., Шашунькина В. М., Юдович Л. А. — Геомагнетизм и аэрномия, 1978, 18, с. 539.
7. DeVries L. L. — Space Res., 1972, 12, p. 777.
8. DeVries L. L. — Space Res, 1972, 12, p. 867.
9. Akasofu S. I., Kamide I. — Planet Space Sci, 1976, 24, p 223
10. Liu C. H., Jeh K. C. — Tellus, 1971, 12. p. 150.

Институт земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн АН СССР

Поступила в редакцию
25 февраля 1980 г.

GENERATION OF INTERNAL GRAVITATIONAL WAVES IN THE PERIOD OF A MAGNETIC STORM

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

A comparison is made of experimental data with calculation for a traveling ionospheric disturbance in the period of a magnetic storm on 25, May 1967. The disturbance is associated with internal gravitational waves excited by pondermotive forces occurred due to currents in auroral electric jet. Calculations of the amplitude, velocity of the disturbance motion and the wave vector give a satisfactory agreement with variations obtained using the ionosphere vertical sounding stations and satellite data.

Аннотации депонированных статей

УДК 621.396.67

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДИАГРАММ НАПРАВЛЕННОСТИ ЛИНЕЙНОЙ И ПЛОСКОЙ АНТЕНН АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ, МИНИМАЛЬНО ОТКЛОНЯЮЩИМСЯ ОТ ЗАДАННОГО

С. А. Касьянок

Решается следующая задача: как следует изменить амплитудно-фазовое распределение (АФР) в раскрыве линейной и плоской антенн, реализующее некоторую диаграмму направленности (ДН), чтобы новая ДН и ее производные интерполировали заданные значения в n фиксированных точках, причем новое АФР должно минимально отклоняться от заданного АФР. В качестве нормы отклонения использованы средне-квадратическое значение, среднее значение и максимальное отклонение (чебышевский критерий).

*Статья депонирована в ВИНТИ,
рег. № 3069-80. Деп. от 15 июля 1980 г.*