

## ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ПЛАЗМЫ ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЫ В НЕОДНОРОДНОМ ГЕОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

<sup>1</sup>Н.И. Ижовкина, <sup>1</sup>А.Т. Карпачев, <sup>1</sup>И.С. Прутенский,  
<sup>1</sup>С.А. Пулинец, <sup>2</sup>З. Клос, <sup>2</sup>Х. Роткель

## ELECTROSTATIC RADIATION OF THE UPPER IONOSPHERE PLASMA IN THE INHOMOGENEOUS GEOMAGNETIC FIELD

<sup>1</sup>N.I. Izhovkina, <sup>1</sup>A.T. Karpachev, <sup>1</sup>I.S. Prutensky,  
<sup>1</sup>S.A. Pulinets, <sup>2</sup>Z. Klos, <sup>2</sup>Kh. Rotkel

Спектры электростатического излучения электронного компонента ионосферной плазмы зависят от геофизических условий. Изменение направления геомагнитного поля, знака одной из компонент поля на геомагнитном экваторе может быть причиной формирования крупномасштабной неоднородной плазменной структуры. Важную роль в процессах формирования структуры неоднородной плазмы играет возбуждение и затухание электростатических колебаний и плазменных вихрей.

Возбуждение свободных колебаний в верхней ионосфере зависит от внешних источников и параметров плазмы. Ниже приведены данные наблюдений волнового излучения ионосферной плазмы на спутнике АПЭКС [1]. Процессы образования плазменных неоднородностей в неустойчивой плазме зависят от генерации, распространения и затухания электростатических колебаний. Необходимо учитывать трансформацию фазового объема свободных колебаний в пространстве частота – волновой вектор ( $\omega, \mathbf{k}$ ) [1]. Можно показать, что с уменьшением плотности плазмы фазовый объем свободных электростатических колебаний сокращается, при этом полоса частот свободных колебаний сокращается со стороны высоких частот. Распространение колебаний в плазменную полость (область пониженной плотности плазмы) приведет к постепенному затуханию колебаний со стороны высоких частот и нагреву плазмы. Затухание электрического поля колебаний, ортогонального геомагнитному полю, связано с поляризационным дрейфом заряженных частиц из плазменной полости [1]. При нагреве плазмы и ее вытеснении с ростом градиентов давления, а также при поляризационном дрейфе заряженных частиц в области затухания электрического поля могут нарастать градиенты плотности плазмы, поперечные геомагнитному полю. В таком процессе возникают условия для генерации плазменных вихрей – вращающихся самосогласованных плазменных неоднородностей с размерами, превышающими ларморский радиус ионов [3]. Ионосферная плазма неустойчива относительно электростатических колебаний электронного компонента плазмы с длиной волны порядка нескольких ларморовских радиусов электронов [1, 2]. Механизмы генерации электростатического и электромагнитного излучения в ионосфере сложны. Например, интенсивное электромагнитное излучение – авроральное километровое излучение (АКР) – наблюдалось в авроральной зоне во время суббури. При этом отмечалось, что появление такого излучения связано с регистрацией крупномасштаб-

ной плазменной полости. Образование плазменной полости возможно и в области геомагнитного экватора при затухании в неоднородном геомагнитном поле плазменных вихрей и электростатических колебаний. Спектр электростатического излучения ограничен сверху на уровне локальной плазменной частоты.

На рисунке показаны частотные спектры волнового излучения, измеренные на спутнике АПЭКС, в зависимости от мирового времени UT, магнитного локального времени MLT, долготы LONG, геомагнитного наклонения IMAG и высоты ALT. Частота указана в МГц. Показан спектр в области геомагнитного экватора, измеренный 22.05.1992 г. после суббури при  $D_{st} \sim -22$  нТл,  $\sum K_p = 19$ . Светлыми линиями указаны гармоники гирочастоты электронов. На экваторе наблюдалась крупномасштабная плазменная полость.

С использованием принципа плазменного подобия можно оценить поток энергии колебаний электронного компонента в область пониженной плазменной плотности (плазменную «ямку»), наблюдающуюся на геомагнитном экваторе:

$$F \sim v_g \kappa(n_0 T)(n_0 - n) / n_0, \quad (1)$$

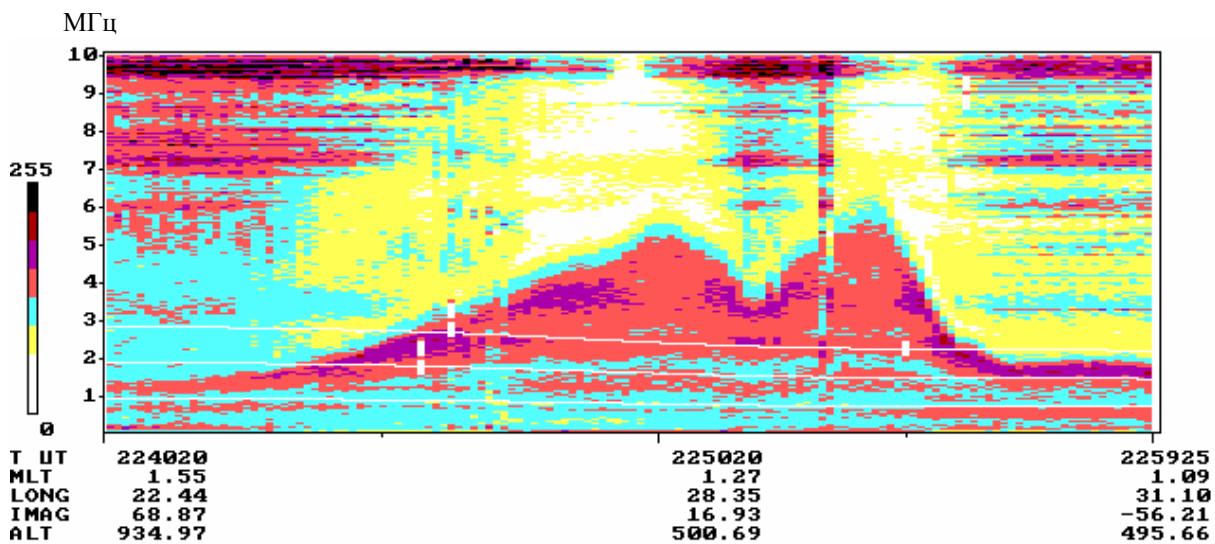
где  $\kappa(n_0 T)$  – плотность энергии колебаний вне плазменной «ямки»,  $\kappa \sim 0.1-0.01$  в зависимости от функции распределения электронов в пространстве скоростей,  $v_g$  – групповая скорость электростатических колебаний.

Для температурного фронта уравнение вихревой структуры можно представить в виде, удобном для анализа влияния нелинейных членов уравнения на устойчивость вихревой структуры:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ -v_{dc} \ln(\Delta\phi) + \frac{e}{T} v_{dc} \phi + \frac{e}{m_i \Omega_{0i}} \frac{e}{T} \frac{\partial \ln T}{\partial y} \frac{\phi^2}{2} \right] + \frac{e}{m_i \Omega_{0i}} J(\phi, \ln(\Delta\phi)) = 0, \quad (2)$$

где  $J(\phi, \ln(\Delta\phi)) = \phi_x (\ln \Delta\phi)_y - \phi_y (\ln \Delta\phi)_x$  – якобиан,  $\Omega_{0i}$  – циклотронная частота ионов,  $T$  – температура плазмы, ось  $z$  направлена вдоль геомагнитного поля. Можно предположить, что скорость дрейфа вихря  $v_{dc}$  в уравнении (2) при смещении вихря в гравитационно-тепловом возмущении, связанном с движением подсолнечной точки, сопоставима со скоростью ионного звука.

В уравнении (2) при условии равенства нулю первого слагаемого в 0 обращается и второе, связанное с векторной нелинейностью. Иными словами, если функция в квадратных скобках в (2) не зависит от



Динамический спектр волнового излучения, зарегистрированного 22.05.1992 г. на спутнике АПЭКС в области геомагнитного экватора.

$x$ , якобиан, связанный с векторной нелинейностью, равен нулю. В отличие от вывода уравнения Хасегава–Мимы [4], было использовано предположение об однородности плазмы при  $\phi = 0$  и наличии нескомпенсированного заряда  $\Delta\phi \neq 0$ . При наложении фронтально-го температурного возмущения можно определить условия, при которых дисперсия и нелинейность Кор-тевега – де Бриза взаимно скомпенсированы. При этом векторная нелинейность обращается в 0. Анализ устойчивости вихревой структуры в неоднородном геомагнитном поле на геомагнитном экваторе можно произвести на основе следующей физической модели.

Скорость вращения частиц плазмы в вихревой структуре при изменении направления геомагнитного поля  $\mathbf{B}$  на  $(-\mathbf{B})$  должна изменить знак. Такое изменение связано с ускорением частиц, но геомагнитное поле работы не совершает. Электрическое поле вихря связано непосредственно с самосогласованным вращением вихревой структуры, а не с каким-либо внешним источником. При указанных изменениях направления геомагнитного поля на пути движения вихря может включиться эффект катапульты. При этом движение частиц по инерции приведет к нарушению самосогласованного вращения вихревой структуры, стохастизации движения частиц, нагреву плазмы и вытеснению ее из области нагрева при увеличении градиентов плазменного давления.

Оценки скорости нагрева по формуле (1) показывают, что плазменная ямка, представленная на рисунке, может прогреваться электростатическими колебаниями электронного компонента плазмы за время, сопоставимое с периодом вращения спутника вокруг Земли. Образование вихревых структур и их затухание в неоднородном геомагнитном поле способствует ускорению образования плазменной ямки на геомагнитном экваторе. Рассматриваемый процесс формирования вихрей является стохастическим, поэтому наблюдения ямки на геомагнитном экваторе носят вероятностный стохастический характер.

В области затухания полей электростатических колебаний и вихревых структур на геомагнитном

экваторе на спутнике АПЭКС наблюдался поляризационный дрейф заряженных частиц: превышение ионных потоков относительно электронных на порядки величины и наблюдение потоков ионов и электронов в противофазе [5].

### Заключение

Инкременты электростатических колебаний электронного компонента плазмы могут составлять  $\gamma \sim 0.1 \Omega$  [1], длина нарастания и затухания электростатических мод в плазме верхней ионосферы – метры. Наблюдения на спутнике АПЭКС волнового излучения в диапазоне бернштейновских мод электронного компонента плазмы в области геомагнитного экватора позволяют сделать выводы о том, что формирование крупномасштабной плазменной неоднородности типа ямки связано с затуханием электростатических колебаний электронного компонента. Локализация ямки на геомагнитном экваторе позволяет предположить, что на формирование неоднородной структуры влияет электродинамика плазменных вихрей в неоднородном геомагнитном поле. Формирование вихревых структур на попеченных к геомагнитному полю градиентах плазменного давления в плазме с неустойчивым электронным компонентом носит стохастический характер, что находит отражение в стохастичности наблюдений областей пониженной плазменной плотности на геомагнитном экваторе. В области плазменной ямки наблюдается рост электромагнитного излучения на частотах выше локальной верхнегибридной, что также является индикатором ямки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ижовкина Н.И., Карпачев А.Т., Прутенский И.С. и др. Процессы нагрева и распада неоднородностей в электростатически неустойчивой плазме верхней ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. 2001. Т. 41, № 4. С. 490–494.
2. Kennel C.F., Ashour-Abdalla M. Electrostatic waves and the strong diffusion of magnetospheric electrons // Magnetospheric plasma physics / Ed. by A. Nishida. Tokyo: Reidel Publishing Company USA, 1982. 348 p.

3. Абурджания Г.Д. Самоорганизация нелинейных вихревых структур и вихревой турбулентности в диспергирующих средах / Под ред. Г.Д. Ломинадзе. КомКнига, 2006. 328 с.
4. Незлин М.В., Черников Г.П. Аналогия дрейфовых вихрей в плазме и геофизической гидродинамике // Физика плазмы. 1995. Т. 21, № 11. С. 975–999.
5. Редерер Х. Динамика радиации, захваченной геомагнитным полем. М.: Мир, 1972. 192 с.

<sup>1</sup>Институт земного магнетизма, ионосфера и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкина РАН, Троицк

<sup>2</sup>Центр космических исследований, ЦКИ ПАН, Варшава, Польша