

Резонансное взаимодействие надтепловых ионов с ионно-циклотронными волнами, генерируемыми молниевыми разрядами

И.В. Кузичев¹, Д.Р. Шкляр^{1,2}

¹Институт космических исследований РАН

²Московский физико-технический институт (государственный университет)

Электромагнитное излучение в КНЧ/ОНЧ диапазоне, генерируемое молниевыми разрядами, играет важную роль в динамике ионов в ионосфере и низковысотной магнитосфере. В частности, нижнегибридные волны, возбуждаемые излучением молниевых разрядов, могут резонансно взаимодействовать с ионами, приводя к их нагреву. Такое взаимодействие в ионосфере имеет место для ионов с энергиями, значительно превышающими тепловую энергию. Так, в работе [1] было показано, что для типичных ионосферных условий ускорение ионов за счёт взаимодействия с нижнегибридными волнами эффективно для ионов с энергиями > 6 эВ, тогда как характерная тепловая энергия ~ 0.2 эВ. В качестве механизма предварительного нагрева может выступать взаимодействие надтепловых ионов с ионно-циклотронными волнами, также генерируемыми молниевыми разрядами.

Расчёт геометрооптических траекторий показывает [2], что некоторые волновые пакеты ионно-циклотронных волн, генерируемых молниевыми разрядами, «застревают» в области, где частота волны становится близка к локальной ионной гирочастоте. Такие волновые пакеты характеризуются частотой волны и волновым вектором, которые изменяются в пространстве и во времени, и, следовательно, вдоль траектории частицы. При этом волновой вектор линейно нарастает со временем, так что волна становится квазиэлектростатической.

В этом докладе мы представим результаты исследования резонансного взаимодействия ионов с такими особыми пакетами ионно-циклотронных волн. Было получено аналитическое выражение для фазы волнового пакета, выведены уравнения движения ионов в соответствующем поле, получены резонансные условия. Для надтепловых ионов основной вклад во взаимодействие даёт первый циклотронный резонанс. Резонансное условие для него определяется отстройкой частоты волны от локальной ионной гирочастоты. Численные расчёты для пробных частиц и аналитические оценки демонстрируют существенное различие между взаимодействием, рассматриваемым нами, и взаимодействием с волнами широкого спектра, описываемым квазилинейной теорией. Взаимодействие с волнами широкого спектра приводит к диффузии частиц в фазовом пространстве, в то время как исследуемое в данной работе взаимодействие приводит к преимущественному ускорению ионов, с недиффузионным характером их ускорения. Полученные результаты демонстрируют, что резонансное взаимодействие с низкочастотным излучением молниевых разрядов представляет собой регулярный и эффективный механизм ускорения надтепловых ионов в ионосфере, и, в силу закона сохранения энергии, обеспечивает затухание рассматриваемых ионно-циклотронных волн.

Работа была выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-32-00721 мол_a

Литература

1. Bell, T. F., Helliwell R. A., Inan U. S., Lauben D. S. The heating of suprathermal ions above thunderstorm cells // Geophys. Res. Lett. 1993. 20. 1991–1994.
2. Shklyar, D. R., Storey L. R. O., Chum J., Jiricek F., Nemec F., Parrot M., Santolik O., Titova E. E. Spectral features of lightning-induced ion cyclotron waves at low latitudes: DEMETER observations and simulation // J. Geophys. Res. 2012. 117. A12206. doi:10.1029/2012JA018016.