

Д. И. Вавилов, Д. Р. Шкляр

## ВОЛНОВЫЕ ЭФФЕКТЫ, СВЯЗАННЫЕ С ВЫСОТНЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ ИОННОГО СОСТАВА ИОНОСФЕРЫ

*Известия вузов. Радиофизика, Том LIX, № 7, стр. 575-592, 2016*

### *Аннотация*

Свойства волн в диапазоне частот ниже протонной гирочастоты, которые могут распространяться в магнитоактивной плазме, существенно зависят от её ионного состава. Добавление нового сорта ионов приводит к появлению новой резонансной частоты, на которой показатель преломления обращается в бесконечность, и новой частоты отсечки, на которой показатель преломления обращается в нуль. При этом изменяется топология зависимости квадрата показателя преломления от частоты, в частности появляется новая ветвь колебаний, которая лежит выше частоты отсечки. Возникает вопрос о возбуждении этих колебаний при наличии в плазме излучения с соответствующей частотой, распространяющегося в другой волновой моде. Линейная трансформация волн является другим важным эффектом, связанным с изменением ионного состава плазмы. Указанные два вопроса, которые имеют непосредственное отношение к теории формирования протонных свистов в ионосфере, где ионный состав изменяется с высотой, составляют предмет исследования в данной работе.

Главной трудностью в решении уравнений, описывающих трансформацию волн в многокомпонентной столкновительной плазме, является неустойчивость основных уравнений, связанная с наличием у них экспоненциально нарастающих мод. В работе предложен метод для исключения этих мод из решения и разработана соответствующая схема численного решения основных уравнений.

Основные результаты работы сводятся к следующим. Во-первых, показано, что при распространении в плазме ионно-циклотронной волны на заданной частоте через область, где возникает вторая распространяющаяся мода на той же частоте, не происходит вынужденной трансформации волн. Во-вторых, исследовано влияние столкновений на линейную трансформацию ионно-циклотронных волн в области, где их показатели преломления сближаются. Показано, что в отсутствие столкновений коэффициенты трансформации  $T_{p \rightarrow s}$  и  $T_{s \rightarrow p}$  равны, где индексами  $p$  и  $s$  отмечены две моды, распространяющиеся на одной частоте. Коэффициент трансформации существенно зависит от угла распространения  $\theta$ , который в предположении вертикального начального распространения является однозначной функцией геомагнитной широты. Конкретно, коэффициент трансформации возрастает с уменьшением угла  $\theta$ . Зависимость коэффициента трансформации от частоты оказывается слабой, за исключением больших (около 500 Гц) и малых (около 250 Гц) частот. Коэффициент трансформации зависит от выбора высоты, где он вычисляется: с ростом высоты он испытывает слабые затухающие колебания.

Наибольший интерес представляет влияние столкновений на трансформацию волн. При учёте столкновений коэффициенты трансформации  $T_{p \rightarrow s}$  и  $T_{s \rightarrow p}$  становятся различными, причём величина  $T_{p \rightarrow s}$  возрастает по сравнению с бесстолкновительным случаем, а  $T_{s \rightarrow p}$ , напротив, убывает, так что при учёте столкновений  $T_{p \rightarrow s} > T_{s \rightarrow p}$ . При увеличении частоты столкновений этот

эффект усиливается, особенно для больших частот (около 500 Гц). При этом коэффициент трансформации зависит от высоты, на которой он вычисляется, т. к. более быстрое затухание  $p$ -моды по сравнению с  $s$ -модой приводит к кажущемуся росту коэффициента  $T_{p \rightarrow s}$  и уменьшению  $T_{s \rightarrow p}$ . При учёте столкновений, как и в бесстолкновительном случае, оба коэффициента значительно возрастают с ростом широты.