

## **ВОЗБУЖДЕНИЕ ВЕРХНЕГИБРИДНОГО РЕЗОНАНСА В ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЕ ПОЛЕМ МОЩНОЙ РАДИОВОЛНЫ**

*В.В.Васьков, С.Ф.Голян, А.В.Гуревич, Я.С.Димант,  
В.А.Зюзин, В.Ю.Ким, Г.П.Комраков, Л.А.Лобачевский,  
В.В.Мигулин, Н.А.Митяков, В.А.Панченко, В.П.Полиматиди*

Обнаружено эффективное вытеснение ионосферной плазмы из локализованной области в окрестности верхнегибридного резонанса мощной радиоволны и возникновение в этой области "плазменного рефлектора", фокусирующего пробные волны. Наблюдаемые эффекты свидетельствуют о локальном возбуждении здесь плазменной турбулентности.

Специфика взаимодействия мощной радиоволны обыкновенной поляризации с замагниченной плазмой верхней ионосферы проявляется в резком выделении области верхнегибридного резонанса (ВГР), расположенной на  $3 \div 10$  км ниже точки отражения обыкновенной волны вблизи уровня  $f_p = f_{\text{ВГР}} \equiv \sqrt{f_0^2 - f_H^2}$ , где  $f_p = (e^2 N / \pi m)^{1/2}$  — плазменная частота электронов, зависящая от локального значения их концентрации  $N$  на высоте  $z$ ,  $f_0$  — частота мощной радиоволны,  $f_H = eH / 2\pi mc \approx 1,4$  МГц — гирочастота электронов. Согласно теоретическим представлениям <sup>1, 2</sup>, именно здесь должно происходить сильное anomальное поглощение мощной радиоволны за счет трансформации ее энергии в коротковолновые колебания плазмы — плазменные волны <sup>3, 4</sup>. Характер трансформации определяется влиянием вытянутых вдоль магнитного поля мелкомасштабных неоднородностей, градиент концентрации в которых ортогонален магнитному полю  $H$ . Такие неоднородности сами интенсивно генерируются в области ВГР мощной радиоволны в процессе нагрева электронов при столкновительной диссипации плазменных волн <sup>3 - 5</sup>. Оценки показывают, что толщина  $\Delta z$  зоны anomального поглощения невелика:  $\Delta z \lesssim 1$  км. Важно, что в таком узком слое должно происходить не только интенсивное возбуждение, но и значительное накопление энергии медленных волн. Поэтому локальное anomальное поглощение мощной радиоволны должно приводить на высотах  $z > 200$  км к эффективному тепловому и стрикционному выдавливанию плазмы из области ВГР.

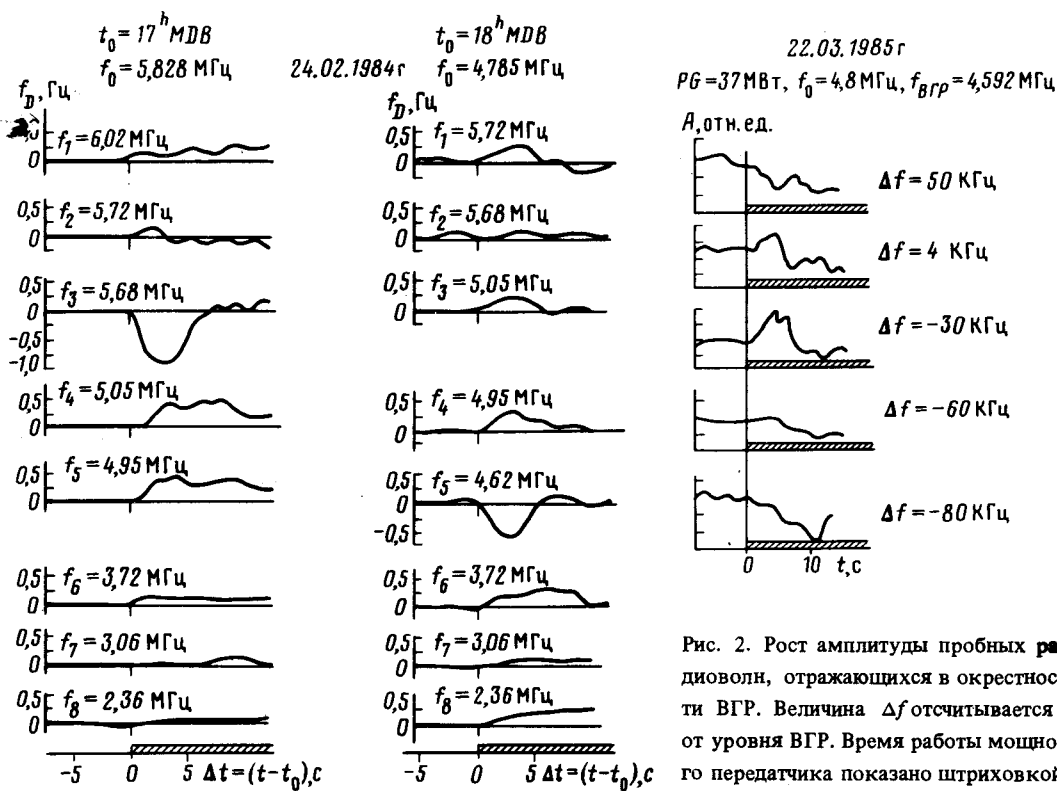


Рис. 1. Динамика доплеровского смещения частот пробных радиоволн для двух различных частот мощной радиоволны  $f_0$ . Время работы мощного передатчика показано штриховкой

В настоящей работе впервые сообщается об экспериментальном обнаружении этого эффекта. Эксперименты проводились на мощном стенде НИРФИ "Сура" в 1983 – 1985 г. В дневные и вечерние часы в спокойных геофизических условиях. Возмущение ионосферы производилось волнами обыкновенной поляризации на частотах  $f_0 = 4,785 \text{ МГц}$  и  $f_0 = 5,828 \text{ МГц}$  с эквивалентной мощностью излучения  $PG = 150 \text{ МВт}$  и  $PG = 220 \text{ МВт}$ , соответственно. Мощ-

ный передатчик работал в режиме:  $20 \div 30$  с — нагрев, 9 мин — пауза. Состояние невозмущенной ионосферы контролировалось с помощью ионосферной станции "Базис". Диагностика искусственных возмущений осуществлялась методом многочастотного доплеровского зондирования ионосферы путем регистрации амплитуды  $A$  и доплеровского сдвига частоты  $f_D$  слабых пробных волн обыкновенной поляризации одновременно на 8 — 12 частотах  $f_i$ . Наличие большого набора зондирующих частот впервые позволило достаточно подробно (с разрешением до 0,1 км по высоте) исследовать пространственную структуру искусственных возмущений ионосферы.

Эксперименты, проведенные с использованием широкой сетки пробных волн, показали, что на достаточно больших высотах,  $z > 200$  км, область верхнегибридного резонанса мощной радиоволны оказывается резко выделенной. Соответствующая особенность иллюстрируется рис. 1, на котором представлен временной ход доплеровского смещения частоты пробных волн  $f_D(\Delta t)$ . Видно, что включение мощного передатчика приводит к увеличению  $f_D$  на тех пробных волнах, которые отражаются на значительном удалении от уровня ВГР. Наблюдаемый ход доплеровского смещения частоты соответствует среднему увеличению плотности плазмы, возникающему за счет ослабления рекомбинационных процессов при нагреве тепловых электронов и дополнительной ионизации при ускорении сверхтепловых электронов полем электромагнитной волны накачки и возбуждаемых плазменных волн (эти нелинейные процессы подробно исследовались в <sup>6-9</sup>). В то же время, как видно из рис. 1, у пробных волн, отражающихся в непосредственной окрестности уровня ВГР мощной радиоволны, появляется значительный отрицательный сдвиг частоты  $f_D$ , продолжавшийся в течение нескольких секунд после включения мощного передатчика. Это говорит о резком локальном понижении плотности плазмы в области ВГР.

Детальное исследование этого эффекта в экспериментах с узкой сеткой частот пробных волн  $f_i \approx f_{\text{ВГР}}$  показало, что отрицательные значения  $f_D$  наблюдаются в узкой полосе частот  $|\Delta f| = |f_i - f_{\text{ВГР}}| \sim 30 - 50$  кГц. Это означает, что возмущения концентрации в ямке плотности, образующейся в окрестности ВГР, достигают величины  $|\Delta N|/N \approx \Delta f/f_0 \sim 1\%$ , а ее размеры по высоте оказываются порядка  $\Delta z \approx L(|\Delta N|/N) \sim 1$  км. (Здесь  $L \sim 100$  км — характерный масштаб неоднородности невозмущенной ионосферы).

Важно, что вытеснение плазмы наиболее эффективно в центре нагретого пятна, где интенсивность мощной радиоволны максимальна, и плавно убывает к его краям. В результате для пробных волн, отражающихся в области пониженной плотности, формируется вогнутое зеркало — "плазменный рефлектор", который должен приводить к фокусировке отраженной волны, т. е. к увеличению амплитуды принимаемого сигнала. Возникновение такого фокусирующего рефлектора также наблюдалось на опыте. Из рис. 2 видно, что после включения мощного передатчика пробные волны, отражающиеся вне области ВГР, испытывают аномальное ослабление, в то время как амплитуды волн с расстройками  $|\Delta f| = |f_i - f_{\text{ВГР}}| < 50$  кГц, отражающихся в непосредственной окрестности ВГР, возрастают в  $1,5 \div 2$  раза. Ширина полосы этого эффекта хорошо согласуется с результатами доплеровских измерений, а его величина — с теоретической оценкой фокусировки радиоволн с учетом наблюдаемых значений возмущения  $\Delta N$ .

Таким образом, наблюдаемые на опыте особенности в поведении доплеровского смещения частоты и амплитуды пробных волн с частотами  $f_i \approx f_{\text{ВГР}}$  полностью соответствуют представлениям теории о локальном возбуждении плазменной турбулентности в малой окрестности верхнегибридного резонанса мощной электромагнитной волны.

#### Литература

1. Васьков В.В., Гуревич А.В. Кн. Тепловые нелинейные явления в плазме. Горький, ИПФАН СССР, с. 81.
2. Грач С.М. и др. Кн. : Тепловые нелинейные явления в плазме. Горький, ИПФАН СССР, с. 46.
3. Ulmer W.F. Proc. IEEE, 1975, 63, 1022.

4. Ерухимов Л.М. и др. Кн.: Тепловые нелинейные явления в плазме. Горький, ИПФАН СССР, 1979, с. 7.
5. Васьков В.В., Гуревич А.В. Геомагнетизм и аэрономия, 1984, 24, 420.
6. Васьков В.В., Голян С.Ф., Груздев Ю.В. и др. Письма в ЖЭТФ, 1981, 34, 582.
7. Васьков В.В. и др. Исследования эффектов искусственной ионизации ионосферы в поле мощных радиоволн, 1984, М.: ИЗМИРАН СССР, Препринт № 5 (479).
8. Бойко Г.Н., Васьков В.В., Голян С.Ф. и др. Письма в ЖЭТФ, 1984, 39, 533.
9. Бойко Г.Н. и др. Изв. высш. уч. зав., сер Радиофизика, 1985, 28, 960.

Институт земного магнетизма, ионосферы  
и распространения радиоволн  
Академии наук СССР

Научно-исследовательский радиофизический институт  
Министерства высшего и среднего образования РСФСР

Поступила в редакцию  
18 апреля 1986 г.