

СТИМУЛИРОВАНИЕ ВЫСЫПАНИЯ ЭНЕРГИЧНЫХ ЧАСТИЦ ПЛАЗМЕННО-ВОЛНОВЫМ РАЗРЯДОМ В ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЕ

Ю.Н.Агафонов, В.С.Бажанов, В.Я.Иссякаев, Г.А.Марков,
А.А.Похунков, Ю.В.Чугунов, С.А.Кулистиков

Разработан метод глубокой модуляции потока высыпающихся частиц большой энергии ($E_e \approx 40$ кэВ) плазменно-волновым разрядом, возбуждаемым бортовым электромагнитным источником в полярной ионосфере на высотах 100 - 150 км. В спокойной ночной ионосфере получено превышение на порядок возмущенного разрядом потока быстрых электронов над уровнем фона.

Эксперимент был выполнен двумя запусками метеорологических ракет МР-12 в начале октября 1989 г. в северной части Норвежского моря. В качестве бортового источника электромагнитного излучения была использована дипольная антенна в виде проволочного кольца диаметром 2 м, поднятого осевой телескопической штангой на 2 м над головной частью ракеты (диаметр ракеты 0,4 м, ее длина 10 м). Плоскость кольца была перпендикулярна оси ракеты. Для возбуждения разряда в поле плазменных волн ¹ между корпусом ракеты и возбуждающим кольцом подводилось ВЧ напряжение амплитудой ~ 1 кВ на частоте $f_0 = 480$ кГц. ВЧ сигнал модулировался в телеграфном режиме частотами $f_1 = 960$ Гц и $f_2 = 240$ Гц по специальной циклограмме. Для диагностики использовались бортовые приборы: счетчики Гейгера, ленгмюровский зонд, СНЧ приемник на частоты модуляции f_1 и f_2 , фотометр, датчики магнитного поля и ряд других.

Результаты обработки телеметрической информации для пуска 9.10.89 г. в 18 час 31 мин мирового времени приведены на рис. 1, где по горизонтальной оси отложено время полета и соответствующие значения высоты H полета ракеты над поверхностью Земли. По вертикальной оси отложены значения концентрации плазмы N_e вблизи головной части ракеты (кривая 1) и плотности потока электронов I_e с энергией $E_e > 40$ кэВ (кривая 2). Кривая 3 рис. 1 отражает циклограмму работы генератора электромагнитного излучения, на которой верхний уровень соответствует режиму работы с модуляцией на частоте $f_1 = 960$ Гц, средний уровень - модуляции на частоте $f_2 = 240$ Гц, а нулевой уровень соответствует паузе в работе генератора.

Данные эксперимента подтверждают вывод о возможности формирования и поддержания в ионосфере плазменно-волнового разряда в ближнем поле дипольного излучателя ². Данный разряд представляет собой сильное локальное возмущение ионосферных плазменных параметров. Концентрация плазмы вблизи головной части ракеты $N_e \gtrsim 10^7$ см⁻³, температура электронов в возмущенной части $T_e \gtrsim 10$ эВ. Форма плазменного возмущения определяется несколькими факторами. Продольный масштаб (вдоль направления геомагнитного поля) зависит от величины декремента затухания плазменных волн, возбуждаемых антенной в плазме разряда и в рассматриваемой области параметров может достигать значений $l_{||} \gtrsim 1$ км (см. подробнее ³). Поперечный масштаб определяется горизонтальной составляющей скорости ракеты $v_{\perp} \sim 300$ м/с, диффузионными процессами и в данных условиях составляет величину $L_{\perp} \sim v_{\perp} \tau_N \sim 100$ м. Бортовой СНЧ приемник зафиксировал изменения параметров плазмы в разряде с частотами модуляции выходной мощности генератора накачки f_1 и f_2 . Амплитуда колебаний магнитного поля, обусловленная диамагнетизмом неоднородной плазмы, оказалась достаточно большой на указанных частотах, $\Delta H_0 \lesssim 10^{-2}$ Э.

Наиболее важным результатом эксперимента является доказательство возможности модуляции плазменно-волновым разрядом в ионосфере потока высыпающихся

электронов с энергией $E_e \gtrsim 40$ кэВ. На рис. 2 приведен фрагмент зависимости плотности потока быстрых электронов от времени полета, позволяющий проследить тонкую временную структуру потока. Из рис. 1 и 2 видно, что имеются несколько характерных времен, определяющих характер вариации потока. Во-первых, это время выхода вариаций на квазистационарное состояние $\tau_1 \sim 1 \div 1,5$ мин. Далее, есть характерные времена $\tau_2 \sim 2$ с и $\tau_3 \sim 0,3 \div 0,5$ с, отражающие тонкую структуру вариаций потока. И $\tau_4 \sim 1$ с - время, характеризующее процесс релаксации или нарастания потока при выключении и включении генератора. Вкладываемая в разряд мощность менялась в пределах $W \lesssim 700$ Вт.

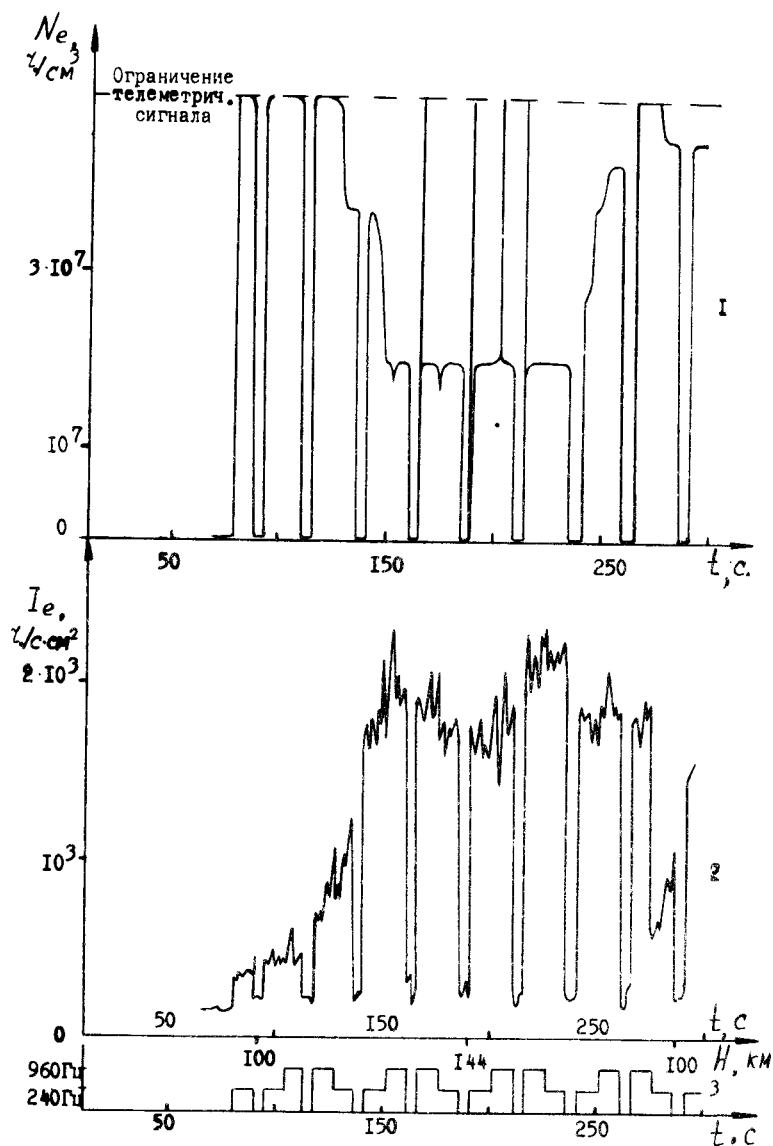


Рис. 1. Стимулированные работой ВЧ источника изменения плотности плазмы N_e вблизи головной части ракеты (1) и потока электронов I_e с энергией $E_e \gtrsim 40$ кэВ в зависимости от времени полета t (2). Циклограмма работы ВЧ генератора (3)

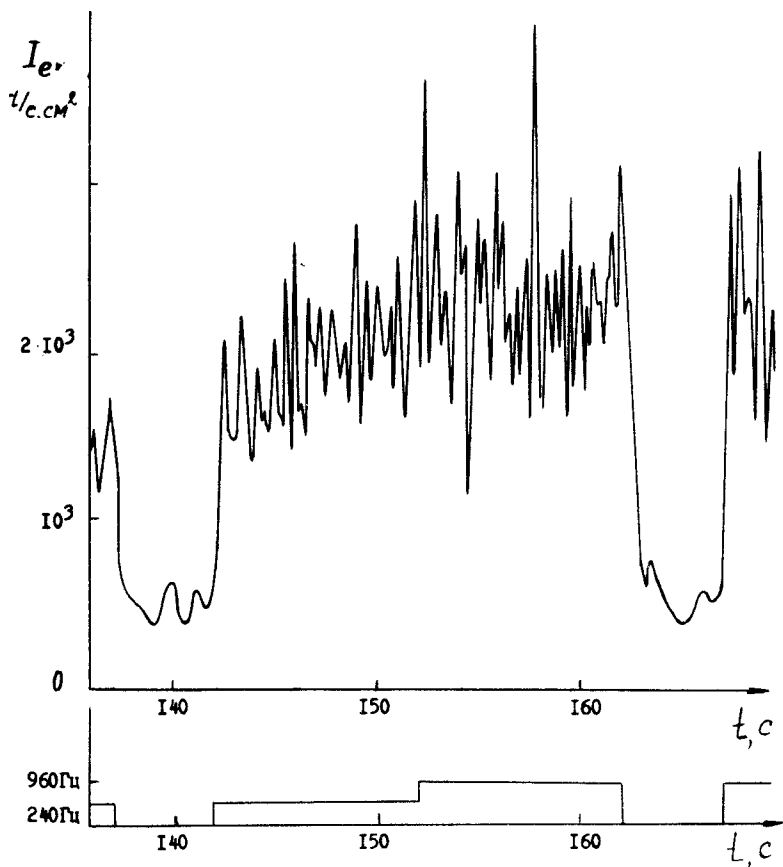


Рис. 2. Тонкая структура стимулированных работой ВЧ источника возмущений потока электронов с энергией $E_e \gtrsim 40$ кэВ - верхняя кривая, циклограмма работы ВЧ генератора - нижняя кривая

В качестве модели, способной качественно объяснить наблюдаемые вариации, мы остановились на теории альфвеновского мазера, развитого в работах ⁴. Во-первых, такой мазер представляет собой распределенную систему в виде совокупности магнитных силовых трубок, опирающихся на ионосферу в сопряженных точках. Во-вторых, режимы генерации в соседних силовых трубках могут существенно отличаться, о чем свидетельствуют, например, пульсирующие пятна в полярных сияниях. Если взять за основу этот механизм вариации активности, то процесс стимуляции высыпания быстрых частиц можно представить следующим образом. Сначала, в течении нескольких циклов работы генератора накачки происходит натекание плазмы из области ионизации в магнитосферную силовую трубку. Этому интервалу времени соответствует время выхода на квазистационарное состояние τ_1 , в течение которого надтепловые частицы в разряде с энергией $\gtrsim 10$ эВ заполняют силовую трубку. В образующемся "волокне" возможно каналирование свистовой моды, а включение разряда изменяет коэффициент отражения этой моды от стенки резонатора, вследствие чего повышается уровень потока высыпающихся частиц. Величина τ_4 соответствует времени распространения свистовой волны по длине силовой трубки. Характерное время $\tau_2 \sim 2$ с совпадает с периодом "баунс-осцилляций" 40 кэВ электронов. Такая модуляция потока есть и во время паузы, однако при работе возмущающего передатчика существенно увеличивается ее глубина. Модуляция с характерным временем $\tau_3 \sim 0,3 \div 0,5$ с может быть связана с тем, что при

слабом возмущении рабочего состояния альфвеновского мазера высыпающие частицы формируются электронами вблизи конуса потерь и угловое распределение их может быть сильно изрезанным, в том числе и из-за собственных колебаний ионосферного альфвеновского резонатора ⁵.

Экспериментальные данные позволяют оценить величину приращения тока быстрых частиц в силовой трубке, опирающейся на возмущенную область: $\Delta i_e \sim e I_e L_{\perp}^2 \sim 1 \text{мкА} \div 10 \text{мА}$. Дисперсия этой величины отражает неопределенность поперечного масштаба возмущенной силовой трубки, который может изменяться от масштаба области ($\sim 10^2 \text{м}$), где ионизация значительна, до некоторого геофизического масштаба, характеризующего, например, минимальный размер пятна в пульсирующих полярных сияниях ($\geq 10^4 \text{м}$).

Соответствующая этому значению переменного тока быстрых частиц равна $W_e \simeq E_e \Delta i_e \sim 40 \text{мВт} \div 400 \text{Вт}$.

Проведенные эксперименты свидетельствуют о достаточно эффективном методе локального влияния на основные параметры ионосферной плазмы. Это влияние можно использовать как в целях стимуляции различного рода спорадических явлений в полярной ионосфере, так и с целью диагностики этих явлений.

Литература

1. Марков Г.А., Миронов В.А., Сергеев А.М. Письма в ЖЭТФ, 1979, 29, 672.
2. Агафонов Ю.Н., Бабаев А.П. и др. Письма в ЖТФ, 1989, 15, 1.
3. Марков Г.А., Попова Л.Л., Чугунов Ю.В. Письма в ЖТФ, 1985, 11, 1465.
4. Беспалов П.А., Трахтенгерц В.Ю. Альфвеновские мазеры. Г. 1986, с. 190.
5. Беляев П.П., Поляков С.В., Рапопорт В.О., Трахтенгерц В.Ю. Геомагнетизм и агрономия, 1984, 24, 242.