

## СТИМУЛИРОВАННАЯ ИОНИЗАЦИЯ ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МОЩНОЙ РАДИОВОЛНЫ

*В.В.Васьков, С.Ф.Голян, Ю.В.Груздев,  
А.В.Гуревич, Я.С.Димант, В.Ю.Ким,  
Л.А.Лобачевский, В.В.Мигулин, В.А.Панченко,  
М.С.Петров, В.П.Полиматиди, В.И.Ситников,  
Л.Д.Шоя, И.С.Шлюгер, К.И.Юрин*

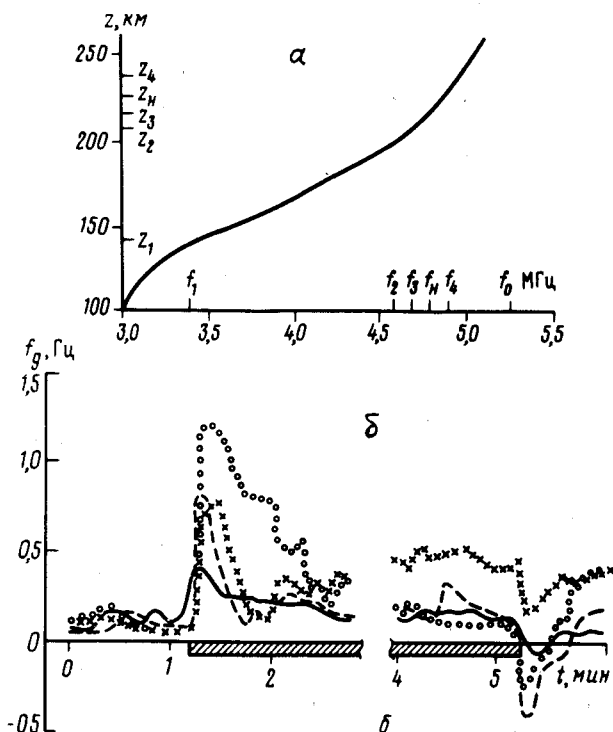
Обнаружено искусственное повышение концентрации электронов в  $F$ -слое ионосферы, вызванное усилением ионизирующего действия фотоэлектронов при воздействии мощной радиоволны.

Исследование искусственного изменения ионосферы представляет значительный интерес. Под воздействием радиоволн в верхней ионосфере, т.е. в области  $F$ -слоя на высотах  $z \sim 200 \div 300$  км, обычно развивается сильно неоднородная структура и возникает понижение концентрации плазмы, вызванное ее выталкиванием из нагретой радиоволнами области [1 — 4]. В настоящей работе обнаружен обратный эффект значительного повышения электронной концентрации в  $F$ -слое ионосферы, причина которого состоит в усилении ионизирующего действия фотоэлектронов под влиянием мощных радиоволн.

Возмущение ионосферы осуществлялось радиостанцией НИИ Радио под Москвой. Частота волны  $f_H = 4,8$  МГц, эффективная мощность излучения  $P_{эфф} = 80$  МВт. Излучение имело круговую поляризацию, соответствующую обыкновенной волне. Диагностика возмущений в ионосфере производилась с помощью доплеровского радиозондирующего комплекса ИЗМИРАН, позволяющего получить с высоким разрешением амплитудные и спектральные характеристик импульсных радиосигналов

одновременно на четырех зондирующих частотах. Зондирующий передатчик находился в одном пучке с нагревным передатчиком, а приемно-регистрирующий комплекс был расположен в 18 км от передающего пункта, так что траектории пробных радиоволн были практически вертикальными. Более подробно методика измерений и аппаратура описаны в [5].

Эксперименты проводились в апреле 1981 г. в утренние часы, когда возмущающая волна отражалась в  $F$ -слое и отсутствовало значительное поглощение в нижних слоях ионосферы. Пробные волны на частотах  $f_1 = 3,4$  МГц,  $f_2 = 4,6$  МГц,  $f_3 = 4,7$  МГц,  $f_4 = 4,9$  МГц отражались ниже и выше уровня отражения мощной волны. На рис. *a* приведен типичный высотный профиль плазменной частоты  $f_o(z)$  в ионосфере во время эксперимента. Видно, что разность уровней отражения пробных радиоволн  $f_1$  и  $f_4$  составила величину  $\sim 100$  км.



*a* — Высотный профиль плазменной частоты  $f_o(z)$  в ионосфере в 09.00 местного времени 19 апреля 1981 г.;  $z_1, z_2, z_3, z_4$  — уровни отражения пробных радиоволн,  $z_H$  — уровень отражения мощной радиоволны; *b* — динамика доплеровского смещения частоты пробных радиоволн при возмущении ионосферы мощным радиоизлучением. Период работы мощного передатчика показан штриховкой (— — —  $f_1 = 3,4$  МГц, — — — —  $f_2 = 4,6$  МГц,  $\times \times \times$  —  $f_3 = 4,7$  МГц,  $\dots$  —  $f_4 = 4,9$  МГц)

На рис. *b* представлены для примера результаты измерений 19 апреля 1981 г. Видно, что практически сразу после включения возмущающей станции появляется значительное доплеровское смещение частот всех пробных радиоволн на величину до 1 Гц. Это означает, что уровни отражения пробных радиоволн смещаются вниз со скоростями  $v \sim 50 \div 100$  м/сек. Примерно через 1 мин достигается стационарное состояние, так что общее смещение ионосферной плазмы составляет величину  $3 \div 6$  км. С учетом реальных ионосферных градиентов это соответствует изменению электронной концентрации на  $2 \div 10\%$  во всем плазменном слое от  $z_1$  до  $z_4$  (рис. *a*). После выключения мощного передатчика наблюдается доплеровский сдвиг частот пробных радиоволн противоположного знака, что соответствует релаксации плазмы к исходному состоя-

нию. Такая картина наблюдалась практически во всех проведенных сеансах нагрева.

Важно, что во время возмущения знак доплеровского сдвига в освещенной Солнцем части ионосферы всегда положителен. Это соответствует росту электронной концентрации. В неосвещенной ионосфере обычно доплеровское смещение имеет обратный знак, что связано с понижением концентрации вследствие выталкивания плазмы при ее нагреве радиоволнами.

Обсудим физическую природу наблюдаемого эффекта. В  $F$ -слое ионосферы в области отражения мощной радиоволны происходит ее интенсивная трансформация в собственные колебания плазмы, что и служит причиной аномального поглощения энергии волны [1, 2, 6]. Аномальное поглощение энергии возмущающей волны до  $70 \div 90\%$  регулярно наблюдалось и в наших экспериментах. Плазменные колебания диссипируют, передавая энергию частично тепловой компоненте, а частично — быстрым электронам. Ускорение быстрых электронов происходит в окрестности плазменного резонанса, лежащего на  $0,5 \div 1,5$  км ниже точки отражения возмущающей волны [6]. Механизмы этого процесса — прямое поглощение Ландау и нелинейное поглощение, связанное с образованием ямок плотности — "кавитонов" [7]. При этом энергия плазменных колебаний передается электронам с энергией  $\mathcal{E}$  на порядок или более превышающий  $T_e$ . Оценка энергии, набираемой быстрыми электронами в области плазменного резонанса в условиях наших экспериментов, дает величину

$$\Delta \mathcal{E} \sim 0,5 \div 1 \text{ эВ.} \quad (1)$$

Это согласуется с данными по искусственному свечению ионосферы, наблюдавшемуся в аналогичных условиях [8]. Температура электронов в  $F$ -слое  $T_e \approx 0,1 \div 0,2$  эВ. Энергия ионизации основных компонент ионосферы  $\mathcal{E}_i = 12,0$  эВ,  $\mathcal{E}_i = 13,6$  эВ,  $\mathcal{E}_i = 15,6$  эВ. Очевидно, что изменение энергии быстрых электронов на  $\Delta \mathcal{E}$  (1) не может привести в этих условиях к сколько-нибудь заметному ионизационному эффекту в равновесной (максвелловской) плазме, что и наблюдается в неосвещенной ионосфере.

Картина полностью меняется в освещенной Солнцем ионосфере, где следует учитывать наличие фотоэлектронов. Фотоэлектроны доминируют в  $F$ -слое в области энергий  $\mathcal{E} > 2 \div 3$  эВ, и хотя их число невелико (порядка  $10^{-3} - 10^{-4}$  от общего количества электронов), они вносят значительный вклад в ионизацию ионосферы: на высотах  $200 \div 250$  км он составляет  $30 \div 50\%$  от фотоионизации  $q_s$  [9]. Определяя изменение ионизационного эффекта фотоэлектронов  $\Delta q_f$  при увеличении их энергии на  $\Delta \mathcal{E}$ , можно показать, что

$$\Delta q_f = \frac{\Delta \mathcal{E}}{T_{ef}} q_f, \quad T_{ef} = \left( f / \frac{\partial f}{\partial \mathcal{E}} \right)_{\mathcal{E} = \mathcal{E}_i}$$

$$\frac{\Delta N}{N_0} = \frac{\Delta \mathcal{E}}{T_{ef}} \frac{q_f}{q_f + q_s}, \quad \Delta \mathcal{E} < T_{ef}. \quad (2)$$

Здесь  $q_f$  — ионизация фотоэлектронами (т.е. число электронно-ионных пар, образуемых фотоэлектронами в 1 сек в  $1 \text{ см}^3$ ),  $T_{ef}$  — эффективная температура в области энергии ионизации,  $f$  — функция распределения фотоэлектронов по энергии,  $\Delta N/N_0$  — возмущение концентрации электронов. На высотах  $200 \div 250 \text{ км}$   $T_{ef} \sim 2 \div 3 \text{ эВ}$  [9]. Отсюда следует, что изменение ионизации (1), (2) вполне согласуется с наблюдаемым эффектом. На усиление ионизации затрачивается при этом лишь несколько процентов общей мощности радиоволны.

Вместе с тем, если вычислить мощность, необходимую для получения наблюдаемого эффекта в равновесной плазме, нетрудно убедиться, что она очень велика — близка по величине к полной мощности радиозлучения. Отсюда ясно, что увеличение концентрации обусловлено стимулированием ионизирующего действия фотоэлектронов.

Институт земного магнетизма,  
ионосферы и распространения радиоволн  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
22 октября 1981 г.

### Литература

- [1] *Utlaut W.F.* Proc. IEEE, 1975, 63, 10 22,
- [2] *Ерухимов Л.М., Метелев С.А., Митякова Э.Е., Мясников Е.Н., Рахлин А.В., Урядов В.П., Фролов В.Л.* В сб. "Тепловые нелинейные явления в плазме", ИПФ АН СССР, Горький, 1979, стр.7.
- [3] *Шлюгер И.С.* Письма в ЖЭТФ, 1974, 19, 247.
- [4] *Gurevich A.V.* Nonlinear phenomena in the Ionosphere, Springer Verlag, New-York, 1978.
- [5] *Васьков В.В., Вязников В.В., Голян С.Ф., Груздев Ю.В., Гуревич А.В., Ким В.Ю., Лобачевский Л.А., Мигулин В.В., Панченко В.А., Петров М.С., Полихитиди В.П., Сергеенко О.С., Ситников В.И., Харьков И.П., Шлюгер И.С., Юрин К.И.* Экспериментальное исследование эффектов самовоздействия мощных радиоволн на гирочастоте электронов в F-области ионосферы доплеровским методом. Препринт №25 (291), ИЗМИРАН, М.: 1980.
- [6] *Васьков В.В., Гуревич А.В.* В сб. "Тепловые нелинейные явления в плазме" ИПФ АН СССР, Горький, 1979, стр. 81.
- [7] *Коврижных Л.М., Сахаров А.С.* В сб. "Взаимодействие сильных электромагнитных волн с бесстолкновительной плазмой", ИПФ АН СССР, Горький, 1980, стр. 117.
- [8] *Haslett J.C., Megill L.R.* Radio Sci., 1974, 9, 1005; *Sipler D.P., Biondi M.A J.* Geophys. Res., 1976, 81, 3467. *Адейшвили Т.Г., Гуревич А.В., Ляхов С.Б., Мангадзе Г.Г., Милих Г.М., Шлюгер И.С.* Физика плазмы, 1978, 4, 1293.
- [9] *Кринберг И.А.* "Кинетика электронов в ионосфере и плазмосфере Земли", М.: Наука, 1978.