

ИСКУССТВЕННАЯ ИОНИЗАЦИЯ ИОНОСФЕРЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ МОЩНЫХ РАДИОВОЛН

А.В.Гуревич, Г.М.Милих, И.С.Шлюгер

Обнаружено возрастание концентрации электронов в нижней ионосфере под действием радиоизлучения большой мощности.

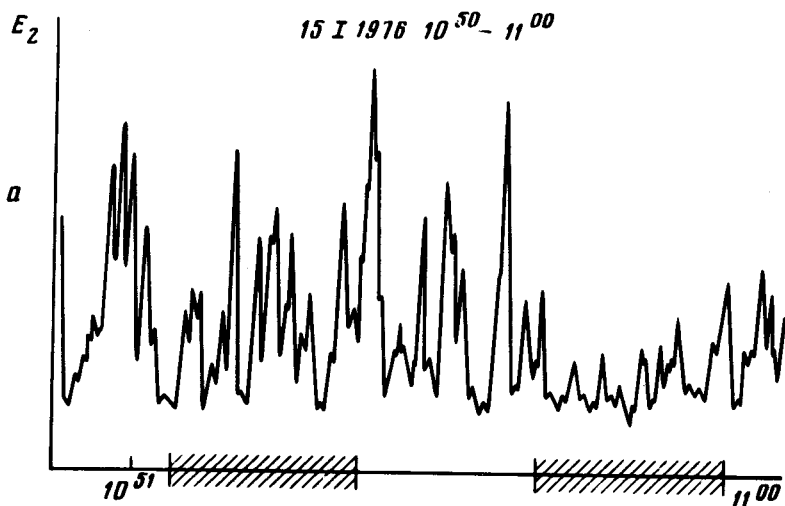
Вопрос о возможности изменения концентрации электронов в N в ионосфере под действием мощных радиоволн вызывает значительный интерес. Теоретический анализ указывал следующие механизмы изменения N : ионизация быстрыми электронами, ускоренными в поле мощной волны [1, 2], изменение коэффициентов рекомбинации при нагреве электронов и изотермическая ионизация, возникающая вследствие общего нагрева газа [3].

Длительные экспериментальные исследования возмущения ионизации ионосферы под действием мощной радиоволны проводились в 1963 – 1967 годах методом ионосферного зондирования [4]. Они показали небольшое возрастание (на 3 + 5%) критических частот слоя E_s (высота $z \sim 130$ км), вызванное, по-видимому, соответствующим увеличением концентрации электронов. В настоящей работе сообщается об обнаружении методом периодической кросс-модуляции значительного увеличения ионизации в нижней ионосфере на высотах $z \sim 70 + 90$ км.

Возмущения в ионосфере вызывал мощный импульсный передатчик, излучавший вертикально вверх радиоволну E_1 на частоте $f_1 = 1,35$ Мгц. Импульсы прямоугольные длительностью $\Delta t_1 \approx 0,5$ мсек. Частота следования импульсов 50 в секунду. Для наблюдения за состоянием ионосферы использовался второй импульсный передатчик, длительность импульса E_2 порядка 100 мсек, частота заполнения $f_2 = 1,6 + 1,8$ Мгц. Подробнее использованная аппаратура описана в [4, 5].

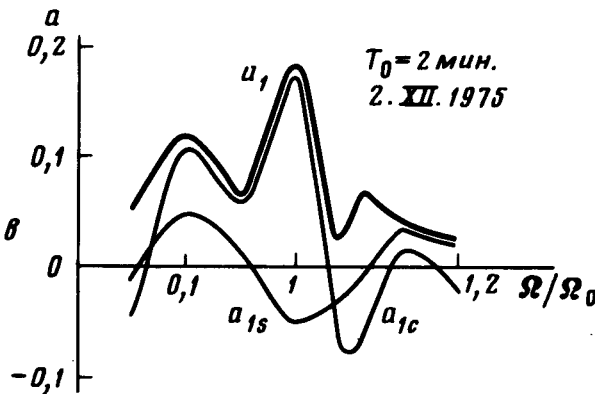
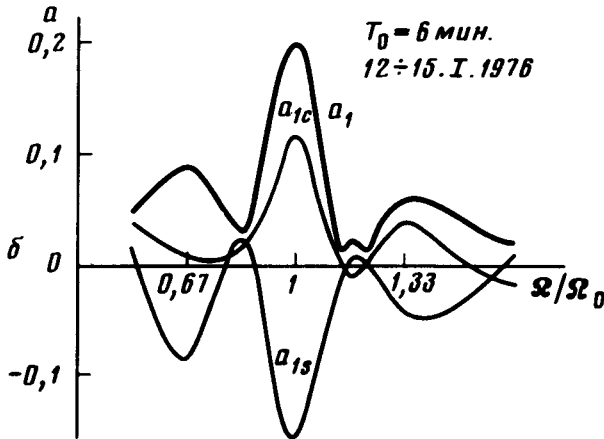
Под действием мощного импульса температура электронов в нижней ионосфере на высотах 70 + 90 км резко возрастает в 20 + 40 раз [4, 6]. Однако, за время 1 + 5 мсек она релаксирует к невозмущенному значению. Если импульс E_2 излучается одновременно (или почти одновременно) с импульсом E_1 , то возмущения T_1 сильно сказываются на импульсе E_2 . Это явление – кроссмодуляция импульсов – хорошо изучено (см., например, [4]).

По мере увеличения $t_2 - t_1$ – времени запаздывания импульса E_2 относительно E_1 , кроссмодуляция ослабевает и при $t_2 - t_1 \geq 5$ мсек, практически незаметна. В нашем случае импульс E_2 излучается через 15 мсек после импульса E_1 , что полностью исключало эффекты обычной кроссмодуляции.



Изменение концентрации электронов также должно сказаться на амплитуде импульса E_2 . Оно характеризуется временем жизни электрона τ_N , которое в нижней ионосфере значительно – порядка 10^2 сек. Однако, ионосфера очень нестабильна и за время порядка τ_N сильно флуктуирует, что приводит к соответствующим флуктуациям амплитуды волны E_2 . Это и затрудняет наблюдение ионизационного эффекта. Для его обнаружения был применен следующий метод. В течение длительного времени (1 + 3 часа) возмущающая станция периодически включалась и выключалась с постоянным периодом T_0 , равным 2 + 6 минут. Наблюдаемая при этом картина изменения во времени амплитуды поля волны E_2 (пример записей сигнала E_2 приведен на рис. 1, а, заштрихованы отрезки времени, в течение которых включалось возмущающее поле) внешне мало отличалась от получаемой обычно в отсутствие возмущения. Однако, при

ее разложении в интеграл Фурье по времени периодическое возмущение с заданным периодом T_0 всегда ясно выделялось (рис. 1, б, в). Возникает как бы кросс-модуляция волны E_2 на сверхнизкой частоте $\Omega_0 = 2\pi/T_0$. Важно, что при этом всегда наблюдается значительный сдвиг фаз между колебаниями амплитуды возмущающего поля E_1 и амплитудой волны E_2 . Это означает, что кросс-модуляционный процесс характеризуется длительным временем релаксации $\tau \sim T_0 \sim 10^2$ сек. Он может быть связан, поэтому лишь с изменениями концентрации электронов в ионосфере¹⁾.



Для количественной оценки наблюдаемого эффекта рассмотрим уравнение баланса ионизации в ионосфере:

$$dN/dt = q - aN^2. \quad (1)$$

¹⁾ Время релаксации температуры электронов меньше на 4 + 5 порядков величины.

Здесь q — внешний источник ионизации, a — эффективный коэффициент рекомбинации. Под воздействием возмущающего поля, периодически включающегося и выключающегося с частотой Ω_0 ($E_1 = E_{10} + E_{11} \sin \Omega_0 t + \dots$), уменьшается коэффициент диссоциативной рекомбинации [3] и усиливается ионизация [1,2]

$$a = a_0 - a_1 \sin \Omega_0 t + \dots, \quad q = q_0 + q_1 \sin \Omega_0 t + \dots, \quad \Omega_0 = 2\pi/T_0. \quad (2)$$

Подставляя выражение (2) в (1), находим периодическое возмущение концентрации в виде

$$N = N_0 + N_{1s} \sin \Omega_0 t + N_{1c} \cos \Omega_0 t + \dots = N_0 + N_1 \sin(\Omega_0 t - \phi) + \dots$$

$$-\frac{N_{1c}}{N_{1s}} = \operatorname{tg} \phi = \Omega_0 \tau_N \sqrt{N_{1c}^2 + N_{1s}^2} = \frac{N_0}{\sqrt{1 + \Omega_0^2 \tau_N^2}} \left(\frac{2a_1}{a_0} + \frac{q_1 \tau_N}{N_0} \right). \quad (3)$$

Здесь $\tau_N = (2a_0 N_0)^{-1}$ время жизни электрона. Учитывая, наконец, влияние возмущений концентрации на амплитуду волны E_2 , имеем

$$E_2 = E_{20} (1 + a_{1s} \sin \Omega_0 T + a_{1c} \cos \Omega_0 t + \dots) \quad (4)$$

$$a_{1s} = -2 \frac{\omega_2}{c} \int \frac{N_{1s}}{N_0} \kappa_{20} dz, \quad a_{1c} = -2 \frac{\omega_2}{c} \int \frac{N_{1c}}{N_0} \kappa_{20} dz.$$

Здесь κ_{20} — коэффициент поглощения волны E_2 .

Результат измерения коэффициентов a_{1s} , a_{1c} и $a_1 = \sqrt{a_{1s}^2 + a_{1c}^2}$ приведен на рис. 1, б, в. По фазе периодических колебаний волны E_2 можно согласно (3), (4) определить время жизни электрона $\tau_N = -\frac{a_{1c}(\Omega_0)}{a_{1s}(\Omega_0)\Omega_0}$.

В наших экспериментах $\tau_N \approx 40 + 70$ сек. Амплитуда колебаний $a_1(\Omega_0)$ позволяет судить о величине ионизационного сдвига. В нашем случае $a_1 \sim 0,2 + 0,3$. Это означает, что величина ионизационного сдвига в возмущенной зоне значительна $\frac{\Delta N}{N_0} = \frac{2N_1}{N_0} \sqrt{1 + \Omega_0^2 \tau_N^2} \sim 1$. Основным

механизмом изменения концентрации плазмы при этом, по-видимому, является ионизация быстрыми электронами.

Исследования возмущенной ионосферы другими методами, в частности, методом частичных отражений и путем измерения свечения в оптическом диапазоне, дадут дополнительную информацию об искусственной ионизации ионосферы.

Авторы благодарны Г.А. Михайловой и В.А. Евтеевой за помощь в обработке результатов эксперимента.

Государственный
научно-исследовательский
институт радио

Поступила в редакцию
3 марта 1976 г.

Литература

- [1] V. A. Bailey. *Nature*, 142, 613, 1938.
 - [2] P. A. Clavier. *J. Appl. Phys.*, 32, 570, 1961.
 - [3] А.В.Гуревич. *Геомагнетизм*, 5, 70, 1965, 11, 953, 1971; 12, 631, 1972.
 - [4] А.В.Гуревич. И.С.Шлюгер. *Изв. высш. уч. зав., сер.Радиофизика*, 18, 1237, 1975.
 - [5] И.С.Шлюгер. *Письма в ЖЭТФ*, 19, 274, 1974.
 - [6] А.В.Гуревич, Г.М.Милих, И.С.Шлюгер. *ЖЭТФ*, 69, 1640, 1975.
-