

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ

УДК 550.388.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АМПЛИТУДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛОВ, ПРОШЕДШИХ ИСКУССТВЕННО ВОЗМУЩЕННУЮ НИЖНЮЮ ИОНОСФЕРУ

В. А. Иванов, Ю. А. Игнатьев, В. А. Фролов, П. Б. Шавин, В. В. Шумаев

Известно, что электронная концентрация нижней ионосферы (слой E и нижняя часть слоя F) на высотах $100 \leq z \leq 200$ км определяется процессами диссоциативной рекомбинации (см., например, [1]). Коэффициент диссоциативной рекомбинации преобладающих на этих высотах атмосферных ионов NO^+ и O_2^+ уменьшается с ростом электронной температуры, что должно сопровождаться ростом величины электронной концентрации и приводить к определенному изменению амплитуд радиоволн, распространяющихся через возмущенную область. Наличие достаточно развитой неоднородной структуры на этих высотах [2, 3] и возможность влияния на нее электромагнитного излучения достаточной мощности [4] должно также приводить к изменению характеристик радиоволн.

Первые экспериментальные исследования по влиянию мощного декаметрового радиоизлучения на нижнюю ионосферу подтвердили эти теоретические представления об увеличении концентрации [5, 6] и изменениях неоднородной структуры в области возмущения [7].

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию влияния искусственного возмущения нижней ионосферы мощными декаметровыми радиоволнами на амплитудные характеристики сигналов наклонного зондирования, которое позволяет оценить как некоторые параметры крупномасштабного возмущения ионосферы, так и изменения ее неоднородной структуры.

1. Методика проведения экспериментов. Эксперименты по изучению влияния искусственно возмущенной нижней ионосферы на сигналы НЗ проводились в дневное время 1983—1984 гг. на трассе протяженностью 250 км. Передатчик работал в импульсном режиме с $\tau_{\text{и}} = 100$ мкс, частотой повторения 100 Гц в диапазоне частот 3,5—4,6 МГц. Прием сигналов НЗ осуществлялся с помощью аппаратуры, позволяющей регистрировать импульсные сигналы с разными задержками.

Воздействие на ионосферу осуществлялось с помощью нагревного комплекса «Сура», расположенного приблизительно в середине трассы. Стенд излучал волны обыкновенной или необыкновенной поляризации на частоте $f_{\text{п}} = 4,785$ МГц с эффективной мощностью $P_{\text{эфф}} = P \times G \approx 50$ МВт циклами 2 мин — нагрев, 3 мин — пауза.

Ионосферная обстановка контролировалась с помощью станции АИС, расположенной в пункте излучения. В периоды проведения экспериментов критическая частота слоя E составляла 3—3,2 МГц, следовательно возмущение этого слоя осуществлялось из-за омических потерь мощной волны. Исходными материалами для обработки являлись оцифрованные с частотой 1 Гц значения амплитуд сигналов НЗ. При обработке рассчитывались усредненные за определенный временной интервал значения амплитуд, автокорреляционные функции и спектры амплитудных флуктуаций сигналов НЗ.

2. Основные экспериментальные результаты. В результате проведения экспериментальных работ были выявлены два основных эффекта влияния на пробные сигналы взаимодействия мощного КВ радиоизлучения с нижней ионосферой: увеличение амплитуды сигналов НЗ во время работы стенда «Сура» и изменение частоты флуктуаций этих сигналов.

Остановимся вначале на первом эффекте. На рис. 1 приведена временная зависимость амплитуды $\bar{A}(t)/A_0$, для частоты пробной волны $f_{\text{пр}} = 4,6$ МГц, нормированной на среднюю амплитуду \bar{A}_0 за первые 30 с нагрева и усредненной стандартным образом по трем последовательным сеансам нагрева вблизи полудня 22.11.83 г. ($t = 12.28 - 12.45$, $n = 3$). Период нагрева отмечен на рисунке штриховкой по оси времени. Из рис. 1 видно, что при включении нагревного стенда нормированная амплитуда постепенно увеличивается, достигая своего максимального значения ($\sim 3,5$) в конце нагрева, после выключения стенда амплитуда постепенно спадает.

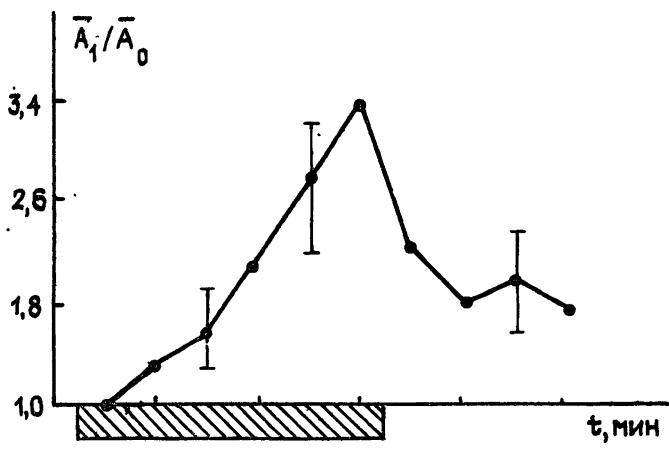


Рис. 1.

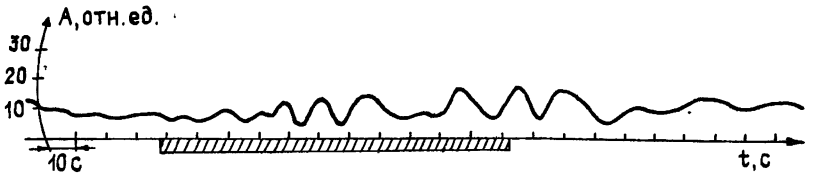


Рис. 2.

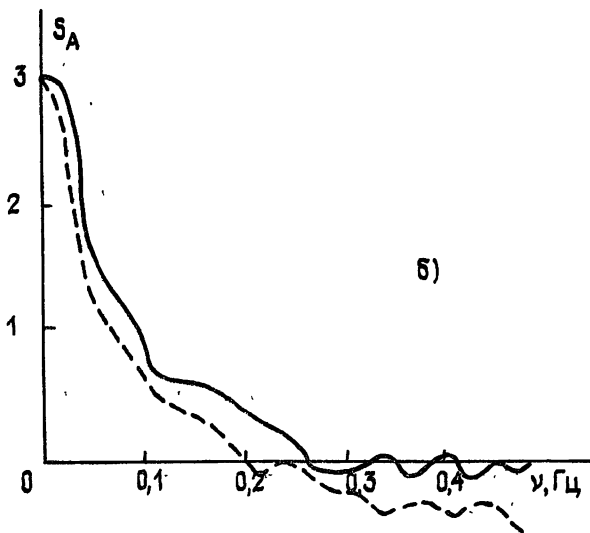
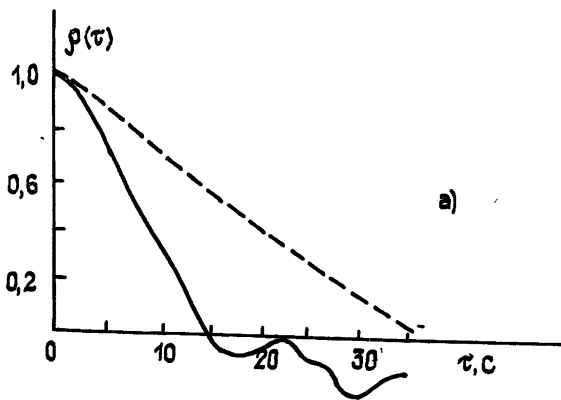


Рис. 3.

Другим ярко выраженным эффектом нагрева является увеличение частоты флуктуаций сигналов НЗ (частота пробной волны $f_{пр} = 3,68$ МГц), характерный пример которого показан на рис. 2. Период нагрева также отмечен штриховкой по оси времени. Анализ автокорреляционных функций, рассчитанных отдельно для случаев нагрева и паузы, показал, что временной радиус корреляции (по уровню 0,5) уменьшился с $\bar{\tau}_н = 8,4$ с для паузы до $\bar{\tau}_н = 6,5$ с при нагреве. Эти данные получены усреднением по девяти последовательным сеансам. Соответственно усредненная ширина спектра амплитудных флуктуаций (по уровню 0,5) $\overline{\Delta S(\nu)}$ увеличивалась с $\overline{\Delta S(\nu)}_н = 0,05$ Гц до $\overline{\Delta S(\nu)}_н = 0,058$ Гц в периоды нагрева. На рис. 3 приведены в качестве примера автокорреляционные функции (рис. 3а, сплошная кривая — $\tau_{к.н} = 6$ с, штриховая — $\tau_{к.н} = 17$ с) и спектры амплитудных флуктуаций (рис. 3б) $S(\nu)$ в период нагрева 13 ч 10 мин — 13 ч 12 мин (сплошные кривые, $\Delta\nu_n = 0,065$ Гц) и период последующей паузы 13 ч 12 мин — 13 ч 15 мин (штриховые кривые, $\Delta\nu_n = 0,045$ Гц) за 04.04.84 г.

3. Обсуждение результатов. Взаимодействие мощных КВ радиоволн с электронным газом нижней ионосферы на высотах 100—200 км приводит к нагреву электронов и вызывает увеличение концентрации на этих высотах из-за температурной зависимости коэффициента рекомбинации. Крупномасштабная область повышенного значения электронной концентрации должна приводить к дополнительной рефракции лучей и воздействию на проходящие пробные радиоволны подобно рассеивающей линзе [1, 8]. Эффект уменьшения амплитуды пробных волн при вертикальном зондировании возмущенной области нижней ионосферы впервые описан в [9].

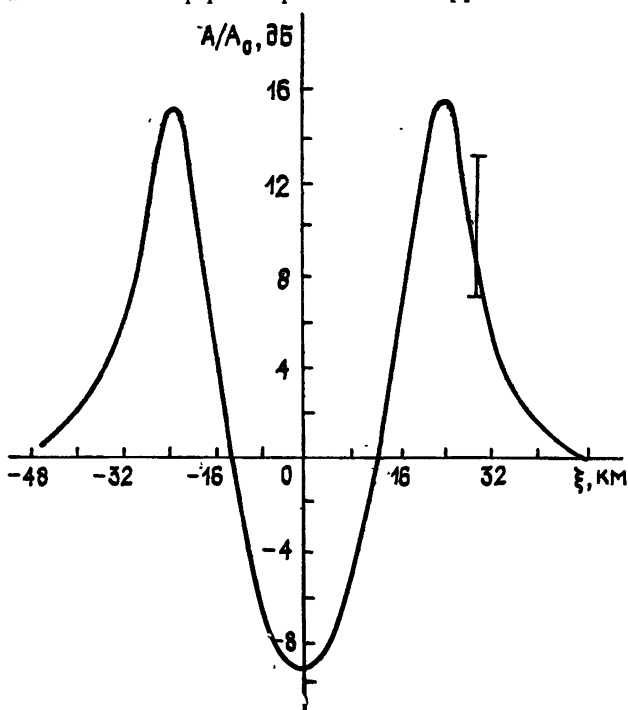


Рис. 4.

Для интерпретации увеличения амплитуды пробных волн обратимся к результатам работы [8], в которой, в частности, рассматривается влияние крупномасштабного возмущения в нижней ионосфере на распространяющиеся через него пробные радиоволны. Коэффициент влияния k области возмущения (ОВ) можно описать выражением

$$k = \left\{ 1 + \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2} \mu \exp \left[-\frac{\xi^2}{2l_{\perp}^2} \right] \left[1 - \frac{\xi^2}{l_{\perp}^2} \right] \frac{l_{\parallel}}{l_{\perp}^2} \right\}^{-1},$$

где L_1 и L_2 — расстояния от излучателя до ОВ и от ОВ до приемника соответственно,

$$\mu = \frac{1}{\epsilon_0} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{f^2 \Delta N_e}{f_{пр}^2 N_{e0}},$$

ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость плазмы на высоте нагрева, $f_{пр}$ — частота пробной волны, f — плазменная частота (при $z = z_{отр}$ для пробной волны), $\Delta N_e / N_{e0}$ — относительное отклонение электронной концентрации от невозмущенного уровня в центре ОВ, l_{\perp} и l_{\parallel} — характерные размеры ОВ перпендикулярно и параллельно лучу,

ξ — текущая координата поперек луча. На рис. 4 приведена расчетная зависимость $k_{дБ} = A(\xi)/A_0$ для $L_1 = L_2 = 200$ км, $f_{пр} = 4,6$ МГц, $f = 4$ МГц, $l_{\perp} = l_{\parallel} = l = 13$ км, $\Delta N_e/N_{e0} = 0,08$. Из рисунка видно, что при $\xi < l$ должно наблюдаться уменьшение амплитуды пробной волны ($A/A_0 < 1$). Однако при $\xi > l$ должно иметь место увеличение амплитуды ($A/A_0 > 1$). На рис. 4 вертикальной линией отмечены экспериментальные значения $A/A_0 = 7,3 \div 13,4$ дБ, полученные в ноябре 1983 г. при $\xi = 30$ км. Видно достаточно хорошее соответствие экспериментальных значений с теоретической величиной $A/A_0 \approx 10$ дБ при выбранных параметрах ОВ. Поэтому можно заключить, что в условиях эксперимента нагрев плазмы приводил к увеличению концентрации N_e на высотах 100—180 км на 6—10%*.

Остановимся далее на интерпретации результатов, связанных с увеличением частоты флуктуаций амплитуд пробного сигнала НЗ во время нагрева ионосферы. В приближении однократного рассеяния радиоволны на замороженных неоднородностях ионосферной плазмы оценим размер неоднородностей $\bar{l} = V\tau_k$, ответственных за флуктуации амплитуды сигналов НЗ. В невозмущенной ионосфере $\bar{l}_n = 640$ м и при нагреве $\bar{l}_n = 450$ м при типичных для E-слоя скоростях дрейфа V неоднородностей порядка 50 м/с. Можно полагать, что при искусственном нагреве ионосферы основной вклад в рассеяние сигнала НЗ на исследуемой трассе вносили неоднородности меньшего, по сравнению с невозмущенными условиями, размера. Этот факт трудно объяснить генерацией искусственной ионосферной турбулентности на высотах слоя E. Используя выражение для определения электронной концентрации в неоднородностях на высотах слоя E при нагреве ионосферной плазмы до температуры ΔT [4],

$$\Delta N \approx N'_0 \left[1 - \frac{k^2 D_a - 2\alpha_0 N_0}{k^2 D_a + 2\alpha_0 N_0} \left(1 - \frac{2\alpha_0 N_0}{k^2 D_a + 2\alpha_0 N_0} \frac{\Delta T}{4T_0} \right) \frac{\Delta T}{2T_0} \right], \quad (1)$$

где N'_0 — максимальное изменение электронной концентрации в неоднородности, $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число неоднородности по вертикали, D_a — коэффициент амбиполярной диффузии при $T_e = T_0$ (T_0 — температура молекул), α_0 — эффективный коэффициент рекомбинации при $T_e = T_0$, можно получить, что в результате нагрева области E электронная концентрация в неоднородностях может как увеличиваться, так и уменьшаться. Существует некоторый критический масштаб неоднородностей

$$\lambda_{кр} = \pi \sqrt{2D_a/\alpha_0 N_0}; \quad (2)$$

если размер неоднородностей $l > \lambda_{кр}$, то нагрев ионосферы приводит к увеличению концентрации электронов в неоднородностях таких масштабов из-за преобладания в них процесса рекомбинации над процессом диффузии. При обратном условии, $l < \lambda_{кр}$, преобладание процесса диффузии приводит к уменьшению концентрации в неоднородностях.

Оценки, проведенные для дневного времени по формуле (2), показывают, что критический размер $\lambda_{кр} \approx 200$ м. Поэтому в неоднородностях с $l \sim 300 \div 500$ м при нагреве будет увеличиваться электронная концентрация, чем и можно объяснить описанное выше поведение статистических характеристик пробных сигналов НЗ при работе нагревного стенда.

На основе приведенных экспериментальных результатов и проведенного обсуждения можно сделать следующие выводы:

— крупномасштабная область возмущения в нижней ионосфере с повышенной электронной концентрацией может вызывать не только уменьшение, но и увеличение амплитуды пробных сигналов НЗ в зависимости от геометрии трассы;

— максимальное отклонение электронной концентрации от невозмущенного уровня в ОВ достигало 6—10% при $P_{эф} \approx 50$ МВт;

— при нагреве нижней ионосферы в геофизических условиях проведенных экспериментов обнаружено увеличение частоты флуктуаций пробного сигнала НЗ, что объясняется увеличением электронной концентрации в существующих в естественных условиях неоднородностях с масштабами $l > 200$ м.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуревич А. В., Шварцбург А. Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. — М.: Наука, 1973. — 272 с.
2. Гершман Б. Н. Динамика ионосферной плазмы. — М.: Наука, 1974. — 256 с.
3. Галкин А. И., Ерофеев Н. М., Казимировский Э. С., Кокоуров В. Д. Ионосферные измерения. — М.: Наука, 1971. — 247 с.
4. Игнатьев Ю. А. // Радиофизика. 1978. Т. 21. № 3. С. 352 (Изв. высш. учеб. заведений).
5. Бенедиктов Е. А., Гетманцев Г. Г., Зюзин В. А., Игнатьев Ю. А. // Геомагнетизм и аэронавигация. 1980. Т. 20. № 5. С. 955.

* Полученные значения $\Delta N_e/N_{e0}$ носят оценочный характер. Для точного расчета влияния области возмущения на амплитуду сигнала НЗ необходим учет дифракционных эффектов.

6. Голян С. Ф., Димант Я. С., Ким В. Ю., Лобачевский Л. А и др. // Геомагнетизм и аэрономия. 1982. Т. 22. № 4, С. 675.
7. Иванов В. А., Игнатъев Ю. А., Фролов В. А., Шавин П. Б., Шумаев В. В. В кн.: Модификация ионосферы мощным радиоизлучением. — М. ИЗМИРАН, 1986. С. 118.
8. Бахметьева Н. В., Бенедиктов Е. А., Игнатъев Ю. А. и др. Препринт НИРФИ № 188. Горький, 1984.
9. Бойко Г. Н., Васьков В. В., Голян С. Ф., Гуревич А. В. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1984. Т. 39. № 11. С. 533.

Научно-исследовательский
радиофизический институт

Поступила в редакцию
2 апреля 1987 г.

УДК 621.372.853.4

ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАТЯГИВАНИЯ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЯ И ЗАТУХАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ В ВОЛНОВОДЕ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ВСТАВКАМИ

Г. М. Герштейн, Д. А. Усанов, Н. Ю. Усов

В [1, 2] обнаружено, что характеристики распространения волны в волноводе с полупроводниковыми вставками в E -плоскости могут иметь аномальную зависимость от параметров этих вставок. В частности, с увеличением проводимости полупроводника затухание волны может как увеличиваться, так и уменьшаться. Для объяснения этого явления потребовалось учесть не только волну основного типа, но и некоторые высшие типы волн. В работе [1] методом приближенного решения системы обобщенных телеграфных уравнений была найдена зависимость коэффициента распространения волны от проводимости и ширины полупроводниковой вставки, размещенной в центре волновода (рис. 1а). В [2] такие зависимости рассчитывались путем численного решения трансцендентного комплексного дисперсионного уравнения для более общего случая, когда две полупроводниковые вставки расположены симметрично относительно плоскости, проходящей через середины широких стенок волновода (рис. 1б). Однако структура поля в поперечном сечении таких систем в указанных работах не анализировалась. Поэтому представлялось целесообразным рассчитать распределение полей различных типов волн в волноводе с полупроводниковыми вставками в достаточно общем случае расположения этих вставок (рис. 1б), а также выявить влияние электрофизических параметров и положения вставок на характер распределения поля и затухание электромагнитной волны. Проведение расчета распределения поля может способствовать выяснению физических причин наблюдавшихся особенностей распространения волны и совершенствованию твердотельных приборов СВЧ на основе продольно-распределенных полупроводниковых структур.

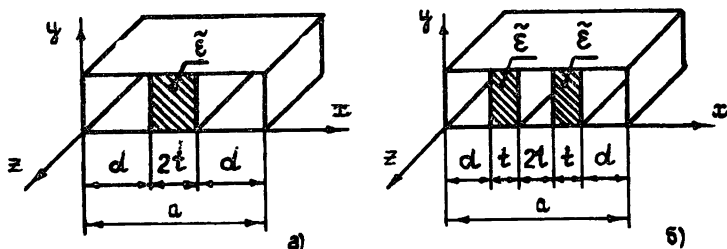


Рис. 1.

Для определения модуля поперечной компоненты электрического поля E_y использовались соотношения, аналогичные полученным в [3].

В области $0 < x < d$:

$$E_y = |\sin \tilde{Y} \sin \tilde{p}x / \sin \tilde{p}d|.$$

В области $d < x < d+t$:

$$E_y = |\sin[\tilde{q}(x-d) + \tilde{Y}]|.$$