

УДК 551.510.535 : 530.18

НЕЛИНЕЙНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ИОНОСФЕРЕ

А. В. Гуревич

Нелинейные эффекты в ионосфере (кросс-модуляции или Люксембург—Горьковский эффект) стали известны и были достаточно подробно исследованы еще в 30—40-х годах [1]. В последние годы, однако, в результате быстрого роста мощности и направленности излучения передающих радиостанций, появилась возможность генерации особо мощных радиоволн—радиоволн, сильно возмущающих нижнюю ионосферу (слой *D* и *E*) и эффективно модифицирующих верхнюю ионосферу (слой *F*). С этим связан новый этап в исследовании нелинейных явлений в ионосфере, начавшийся в 1960—1970 гг.

В нижней ионосфере наблюдается интенсивный разогрев электронов под действием мощных радиоволн—их эффективная температура возрастает в 20—40 раз [2]. Соответственно возрастает частота соударений электронов, что приводит к увеличению нелинейного поглощения радиоволн. В результате наблюдается резкое ослабление и даже падение интенсивности отраженного от ионосферы радиосигнала с ростом мощности излучения (эффект «насыщения»). Нелинейное поглощение достигает при этом 25—30 дБ. Наблюдаются также сильные эффекты взаимодействия волн: «подавление» мощной волной слабой радиоволны (нелинейное затухание до 30 дБ) и обратный эффект «просветления» ионосферной плазмы (уменьшение на 10—15 дБ затухания слабой волны под воздействием сильной). При взаимодействии модулированных по амплитуде радиоволн обнаружено значительное искажение формы модуляции и удвоение частоты модуляции (эффект «перемодуляции»).

Наблюдаемые нелинейные эффекты в нижней ионосфере находятся, в общем, в достаточном соответствии с предсказаниями теории, базирующейся на совместном анализе кинетического уравнения для электронов плазмы и уравнений Максвелла для поля радиоволн [3]. Для более точного количественного анализа существенны уже конкретные детали кинетики электронов в ионосферной плазме. Необходимо знание обширного комплекса характеристик различных неупругих процессов, например, сечений возбуждения электронами вращательных, колебательных и оптических уровней основных молекулярных компонент ионосферы. Детальное сопоставление ионосферных экспериментов с теорией позволяет определить ряд кинетических параметров нижней ионосферы [4].

Обнаружено возмущение концентрации электронов под действием радиоволн [2, 4], которое связано, по-видимому, с нарушением ионизационного баланса [5, 6]. Существенный интерес представляет также возможность высокочастотного пробоя в нижней ионосфере [7], нагрева нейтральной атмосферы и пробивания слоя E_s [8] и т. д.

Особо следует отметить «детектирующий» эффект ионосферы—обнаружение в волноводе Земля—ионосфера радиоволн низкой частоты $F \sim (2 \div 8) \text{ кГц}$, генерируемых за счет нелинейного детектирования в нижней ионосфере мощного высокочастотного радиосигнала, модули-

рованного по амплитуде низкой частотой F [9]. Теория связывает это явление с генерацией комбинационных частот и модуляцией ионосферных токов [3, 10]. При возмущении ионосферы в приполярных и экваториальных областях, где ионосферные токи особенно сильны, можно ожидать значительного усиления детектирующего эффекта.

Модификация верхней ионосферы под действием радиоволн в области максимума F -слоя (высота ~ 300 км) была осуществлена впервые в Боулдере в 1970 г. [11]. Обнаружено значительное возмущение температуры и концентрации электронов [12] в соответствии с предсказаниями теории [3, 13]. Кроме того, открыт ряд важных новых явлений, связанных с возбуждением неустойчивости ионосферы под действием радиоволн. Это, во-первых, крупномасштабное расслоение ионосферной плазмы, приводящее к возникновению искусственного слоя F -спорадического [14]. Спектр масштабов неоднородностей от ~ 100 м до ~ 10 км, возмущения концентрации в них порядка процентов. Теория связывает это расслоение с тепловой самофокусирующей неустойчивостью, развивающейся в области отражения радиоволн [15].

В области отражения обычных радиоволн развивается, кроме того, мелкомасштабное расслоение ионосферной плазмы с образованием сильно вытянутых вдоль магнитного поля Земли неоднородностей [16]. Характерные масштабы этих неоднородностей поперек магнитного поля от 10 см до 1 м, продольный размер их порядка нескольких сот метров или даже километров. Такие неоднородности энергично рассеивают радиоволны УКВ диапазона (с частотами до 100 МГц и даже до 500 МГц). Они могут быть эффективно использованы для обеспечения УКВ радиосвязи между пунктами на Земле, удаленными на расстояние до 3—4 тысяч километров (искусственное ионосферное зеркало) [17], а также для возбуждения и деэксцитации ионосферного волнового канала с целью обеспечения сверхдальнего и кругосветного распространения коротких радиоволн [18]. С мелкомасштабным расслоением, по-видимому, связано также аномальное поглощение обычных радиоволн в верхней ионосфере [19]. Теория связывает мелкомасштабное расслоение с нелинейной резонансной неустойчивостью [20]. На начальной стадии может быть существенна диссипативная параметрическая и дрейфовая неустойчивости [21].

Наконец, обнаружено интенсивное возбуждение плазменных волн в ионосфере [22], а также свечение, вызванное ускоренными электронами [23]. Теория связывает эти явления с параметрической неустойчивостью ленгмюровских колебаний в поле мощной радиоволны [24]. Отметим, что самомодуляция мощного радиопульса, отраженного от F -слоя ионосферы, обнаруженная в [2], по-видимому, также вызвана возбуждением параметрической неустойчивости [25].

Теоретические и экспериментальные исследования нелинейных эффектов в ионосфере в настоящее время интенсивно развиваются.

ЛИТЕРАТУРА

1. L. Huxley, J. Ratcliffe, Proc. Inst. Elect. Eng., **96**, 443 (1949).
2. И. С. Шлюгер, Письма в ЖЭТФ, **19**, 274 (1974); А. В. Гуревич, И. С. Шлюгер, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, **18**, № 9, 1237 (1975).
3. В. Л. Гинзбург, А. В. Гуревич, УФН, **70**, 201, 393 (1960); А. В. Гуревич, А. Б. Шварцбург, Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере, изд. Наука, М., 1973.
4. А. В. Гуревич, Г. М. Милич, И. С. Шлюгер, ЖЭТФ, **69**, 1640 (1975); Письма в ЖЭТФ, **23**, 395 (1976).
5. W. F. Ulaut, E. J. Violette, L. L. Melanson, Radio Sci., **9**, 1033 (1974).
6. А. В. Гуревич, Геомагнетизм и аэронавигация, **5**, 70 (1965); **11**, 953 (1971); G. Meitz, L. H. Holway Jr., N. M. Tomljanovich, Radio Sci., **9**, 1049 (1974).

7. V. A. Bailey, *Nature*, **142**, 613 (1938); P. P. Lombardini, *Radio Sci.*, **1** (69D) 83 (1965); А. В. Гуревич, *Геомагнетизм и аэрономия*, **12**, 631 (1972)
8. А. В. Гуревич, *Геомагнетизм и аэрономия*, **15**, 161 (1975); Ю. А. Игнатъев, *Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика*, **18**, № 9, 1365 (1975); Г. И. Григорьев, *Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика*, **18**, № 12, 1801 (1975).
9. Г. Г. Гетманцев, Н. А. Зубков, Д. С. Котик, Л. Ф. Мироненко, Н. А. Митяков, В. О. Рапопорт, В. Ю. Трахтенгерц, В. Я. Эйдман, *Письма в ЖЭТФ*, **20**, 222 (1974).
10. Д. С. Котик, В. Ю. Трахтенгерц, *Письма в ЖЭТФ*, **21**, 104 (1975); Н. С. Белюстин, В. П. Докучаев, С. В. Поляков, В. В. Тамойкин, *Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика*, **18**, № 9, 1323 (1975).
11. W. F. Utlautei et al., *J. Geophys. Res.*, **75**, 6402 (1970); У. Ютло, Р. Коэн, *УФН*, **109**, 371 (1973).
12. W. E. Gordon, H. C. Carlson Jr., *Radio Sci.*, **9**, 1041 (1974).
13. D. T. Farley Jr., *J. Geophys. Res.*, **68**, 401 (1963); А. В. Гуревич, *Геомагнетизм и аэрономия*, **7**, 291 (1967); G. Meltz, R. E. Lelevier, *J. Geophys. Res.*, **76**, 6406 (1970).
14. W. F. Utlautei, E. G. Violette, A. K. Paul, *J. Geophys. Res.*, **75**, 6429 (1970); C. L. Rufenach, *J. Geophys. Res.*, **78**, 5611 (1973); J. W. Wright, *J. Geophys. Res.*, **78**, 5622 (1973); В. В. Беликовичи др., *УФН*, **113**, 732 (1974); G. D. Thome, D. W. Blood, *Radio Sci.*, **9**, 917 (1974).
15. А. Г. Литвак, *Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика*, **11**, 1433 (1968); В. В. Васьков, А. В. Гуревич, *Письма в ЖЭТФ*, **20**, 529 (1974); *Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика*, **18**, № 9, 1261 (1975); *Геомагнетизм и аэрономия*, **16**, № 1, 50; 239 (1976); F. W. Perkins, E. J. Valeo, *Phys. Rev. Lett.*, **32**, 1234 (1974) Б. С. Абрамович, *Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика*, **19**, № 3, 329 (1976).
16. P. A. Fialer, *Radio Sci.*, **9**, 923 (1974); J. Minkoff, P. Kugelmann, I. Weisman, *Radio Sci.*, **9**, 941 (1974); G. B. Carpenter, *Radio Sci.*, **9**, 965 (1974).
17. G. H. Vaggy, *Radio Sci.*, **9**, 1025 (1974); А. В. Гуревич, *УФН*, **117**, 184 (1975).
18. А. В. Гуревич, Е. Е. Цедилина, *УФН*, **116**, 540 (1975); *Геомагнетизм и аэрономия*, **15**, 1005 (1975).
19. K. Cohen, J. D. Whitehead, *J. Geophys. Res.*, **75**, 6439 (1970); Г. Г. Гетманцев, Н. П. Комраков, П. П. Коробков, Л. Ф. Мироненко, Н. А. Митяков, В. О. Рапопорт, В. Ю. Трахтенгерц, В. Л. Фролов, В. А. Череповицкий, *Письма в ЖЭТФ*, **18**, 621 (1973); Н. С. Чен, J. A. Fejer, *Radio Sci.*, **10**, 167 (1975); Н. А. Митяков, В. О. Рапопорт, В. Ю. Трахтенгерц, *Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика*, **18**, № 9, 1273 (1975); В. В. Васьков, А. В. Гуревич, *Препринт ФИАН № 95, М., 1975; Физика плазмы*, **2**, 113 (1976).
20. В. В. Васьков, А. В. Гуревич, *ЖЭТФ*, **69**, 176 (1975); *Препринт ФИАН № 95, М., 1975.*
21. F. W. Perkins, *Radio Sci.*, **9**, 1065 (1975); С. М. Грач, В. Ю. Трахтенгерц, *Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика*, **18**, № 9, 1288 (1974); Н. Д. Борисов, В. В. Васьков, А. В. Гуревич, *Физика плазмы*, **2**, 816 (1976).
22. H. C. Carlson, W. E. Gordon, R. L. Showen, *J. Geophys. Res.*, **77**, 12 4 (1972); I. J. Kantor, *J. Geophys. Res.*, **79**, 199 (1974).
23. J. C. Haslett, L. R. Megill, *Radio Sci.*, **9**, 1005 (1974).
24. F. W. Perkins, P. K. Kaw, *J. Geophys. Res.*, **76**, 282 (1971); F. W. Perkins, C. Oberman, E. J. Valeo, *J. Geophys. Res.*, **79**, 1478 (1974); J. Weinstock, *Radio Sci.*, **9**, 1085 (1974); Н. А. Митяков, В. О. Рапопорт, В. Ю. Трахтенгерц, *Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика*, **18**, 27 (1975).
25. В. В. Васьков, А. В. Гуревич, *ЖЭТФ*, **64**, 1277 (1973); *Геомагнетизм и аэрономия*, **15**, 235; 412; 633 (1975); Г. М. Жислин, А. Г. Литвак, Н. А. Митяков, В. И. Петрухина, В. О. Рапопорт, В. Ю. Трахтенгерц, *Письма в ЖЭТФ*, **20**, 617 (1974).