

ИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ

551.510.535

НЕЛИНЕЙНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ИОНОСФЕРЕ

В 1930 г. Тележеном и Лбовым было обнаружено, что радиопередачи мощной радиостанции могут прослушиваться на радиоволнах другой частоты. Оказалось, что излучение мощной станции вызывает значительные возмущения в ионосфере. Благодаря этому его модуляция передается другим радиоволнам, распространяющимся в возмущенной области. Это нелинейное явление, названное кросс-модуляцией или Люксембург-Горьковским эффектом, было подробно исследовано еще в 30-х — 40-х годах ¹. Его истолкование дано Бэйли и Мартином в основополагающей работе, опубликованной в 1934 г. ². В. Л. Гинзбургом в 1948 г. был предложен иной, более последовательный подход к описанию кросс-модуляции, базирующийся на кинетической теории Больцмана ³. Этот подход, получивший широкое развитие в работах последующих авторов, лежит в основе теории тепловых нелинейных явлений в ионосфере ^{4, 5}.

В последние годы, в результате быстрого роста мощности и направленности излучения передающих радиостанций, появилась возможность генерации особо мощных радиоволн, сильно возмущающих нижнюю ионосферу (слои D и E , высота 60—120 км) и эффективно модифицирующих верхнюю ионосферу (слой F , высота 200—350 км). С этим связан новый этап в исследовании нелинейных явлений в ионосфере, начавшийся в 1960—1970 гг.

Характерной величиной, определяющей тепловые нелинейные эффекты, является плазменное поле E_p ^{4, 5}:

$$E_p = \sqrt{3Tm\delta} \frac{\omega}{e} \quad (1)$$

(e , m — заряд и масса электрона, T — температура электронов, δ — средняя доля энергии, теряемой электроном при одном ударе, ω — частота радиоволны). Если амплитуда поля радиоволны $E_0 \ll E_p$, то она может вызвать лишь слабое возмущение ионосферы. Наоборот, при $E_0 \gtrsim E_p$ свойства ионосферной плазмы сильно изменяются под действием радиоволны.

В нижней ионосфере плазменное поле E_p сравнительно невелико (например, $E_p \sim 0,05$ в/м при $\omega = 10^6$ сек⁻¹; $E_p \sim 0,3$ — $0,5$ в/м при $\omega = 10^7$ сек⁻¹); здесь современные радиосредства могут создавать поля E_0 , на порядок превышающие E_p . Нелинейность оказывает определяющее влияние на распространение таких сильных радиоволн. Наблюдается интенсивный разогрев электронов в ионосфере — под действием радиоволн эффективная температура электронов возрастает в 20—40 раз ^{6, 7}. Соответственно возрастает частота соударений электронов, что приводит к увеличению нелинейного поглощения радиоволн. В результате возникает резкое ослабление и даже падение интенсивности отраженного от ионосферы радиосигнала с ростом мощности излучения, обнаруженное Шлюгером и др. ⁶. Нелинейное поглощение достигает при этом $25 \div 30$ 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 ^{4, 5}. Для более точного количественного анализа существенны уже конкретные детали кинетики электронов в ионосферной плазме. Необходимо знание конкретных характеристик различных неупругих процессов, например, сечений возбуждения электронами вращательных, колебательных и оптических уровней основ-

ных молекулярных компонент ионосферы. Детальное сопоставление ионосферных экспериментов с теорией позволяет определять кинетические параметры нижней ионосферы ⁷.

На опыте обнаружено также существенное возмущение ионизации нижней ионосферы под действием мощных радиоволн ⁸. Возможность искусственной ионизации ионосферы была указана еще Бэйли в 1938 г. ⁹. В дальнейшем теоретически рассматривались различные конкретные механизмы изменения ионизации: высокочастотный пробой, изменение коэффициентов рекомбинации, изотермическая ионизация ¹⁰. Интересные явления связаны также с возможностью нагрева нейтральной атмосферы и пробивания спорадического *E*-слоя ¹¹.

Особо следует отметить «детектирующий» эффект ионосферы, обнаруженный Гетманцевым и др. ¹²: в волноводе Земля — ионосфера наблюдаются радиоволны низкой частоты $F = 2-8$ *кГц*, генерируемые за счет нелинейного детектирования в ионосфере мощного высокочастотного радиосигнала, модулированного по амплитуде частотой *F*. Возможность этого важного явления, возникающего вследствие нелинейной генерации разностных комбинационных частот в ионосфере, была указана Гинзбургом и др. ^{4, 13}. Детальная теория связывает детектирующий эффект с модуляцией ионосферных токов ¹⁴. При возмущении ионосферы в приполярных и экваториальных областях, где ионосферные токи особенно сильны, следует ожидать значительного усиления детектирующего эффекта. Возможна также нелинейная генерация в ионосфере других комбинационных частот ¹⁵.

Фундаментальную роль в развитии исследований нелинейных явлений сыграла модификация верхней ионосферы, осуществленная впервые Ютло и др. в 1970 г. ¹⁶. Возможность модификации ионосферы, т. е. существенного изменения распределения температуры и концентрации плазмы в *F*-слое под действием радиоволн, была указана Гинзбургом и др. ^{4, 17}. Эти изменения температуры и концентрации электронов обнаружены на опыте в соответствии с предсказаниями теории ¹⁸. Кроме того, открыт ряд новых важных явлений, связанных с возбуждением неустойчивости ионосферы под действием радиоволн. Это, во-первых, крупномасштабное расслоение ионосферной плазмы, приводящее к возникновению искусственного слоя *F*-спорадического ¹⁹. Спектр масштабов неоднородностей от ~ 100 м до ~ 10 км, возмущения концентрации в них порядка нескольких процентов. Теория связывает это расслоение с тепловой самофокусировочной неустойчивостью, развивающейся в области отражения радиоволн ²⁰.

В области отражения обыкновенных радиоволн развивается, кроме того, мелко-масштабное расслоение ионосферной плазмы с образованием очень сильно вытянутых вдоль магнитного поля Земли неоднородностей, обнаруженное Файлером и др. ²¹. Характерные масштабы этих неоднородностей поперек магнитного поля от 10 см до 1 м, продольный размер их порядка нескольких сотен 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) ²², а также для возбуждения и де возбуждения ионосферного волнового канала с целью обеспечения сверхдальнего и кругосветного распространения коротких радиоволн ²³. С мелко-масштабным расслоением, по-видимому, связано также аномальное поглощение обыкновенных радиоволн в верхней ионосфере, обнаруженное Козном и др. ²⁴. Теория связывает мелко-масштабное расслоение с нелинейной резонансной неустойчивостью ²⁵. На начальной стадии могут быть существенны диссипативная параметрическая и дрейфовая неустойчивости ²⁶.

Наконец, Гордоном и др. ²⁷ обнаружено интенсивное возбуждение плазменных волн в ионосфере и свечение, вызванное ускоренными электронами. Теория связывает эти явления с параметрической неустойчивостью лэнгмюровских колебаний, в поле мощной радиоволны ²⁸. Самомодуляция мощного радиоимпульса, отраженного от *F*-слоя ионосферы, обнаруженная в работах ^{6, 29}, по-видимому, также вызвана возбуждением параметрической неустойчивости ³⁰.

Следует отметить также эффект усиленного нелинейного рассеяния необыкновенной волны, вызванный, по-видимому, стрикционным выталкиванием плазмы ³¹.

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

А. В. Гуревич

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. L. Huxley, J. Ratcliffe. Proc. Inst. Elect. Eng. 96 (pt. 2), 443 (1949).
2. V. A. Bailey, P. F. Martin, Phil. Mag. 18, 369 (1934).
3. В. Л. Гинзбург, Изв. АН СССР, сер. физ. 12, 253 (1948).
4. В. Л. Гинзбург, А. В. Гуревич, УФН 70, 201, 393 (1960).

5. А. В. Гуревич, А. Б. Шварцбург, Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере, М., «Наука», 1973.
6. И. С. Шлюгер, Письма ЖЭТФ 19, 274 (1974).
А. В. Гуревич, И. С. Шлюгер, Изв. вузов, сер. «Радиофизика» 18, 1237 (1975).
7. А. В. Гуревич, Г. М. Милих, И. С. Шлюгер, ЖЭТФ 69, 1640 (1975).
8. А. В. Гуревич, Г. М. Милих, И. С. Шлюгер, Письма ЖЭТФ 23, 395 (1976).
9. V. A. Bailey, Nature 142, 613 (1938).
10. P. P. Lombardini, Radio Sci. 1, 83 (1965).
А. В. Гуревич, Геомагн. и аэронав. 11, 953 (1971); 12, 631 (1972).
G. Meltz, L. H. Holway, Jr., N. M. Tomljanovich, Radio Sci. 9, 1049 (1974).
11. А. В. Гуревич, Геомагн. и аэронав. 15, 161 (1975).
Ю. А. Игнатъев, Изв. вузов, сер. «Радиофизика» 18, 1365 (1975).
Г. И. Григорьев, ibid., стр. 1801.
12. Г. Г. Гетманцев, Н. А. Зубков, Д. С. Котик, Л. Ф. МIRONENKO, Н. А. Митяков, В. О. Рапопорт, В. Ю. Трахтенгерц, В. Я. Эйдемман, Письма ЖЭТФ 20, 222 (1974).
13. В. Л. Гинзбург, ЖЭТФ 35, 1573 (1958).
14. Д. С. Котик, В. Ю. Трахтенгерц, Письма ЖЭТФ 21, 104 (1975).
Н. С. Белюстин, В. П. Докучаев, С. В. Поляков, В. В. Тамойкин, Изв. вузов, сер. «Радиофизика» 18, 1323 (1975).
15. И. М. Виленский, в «Сборнике памяти А. А. Андропова», М., Изд-во АН СССР, 1955, стр. 582.
16. W. F. Utlaut et al., J. Geophys. Res. 75, 6402 (1970);
У. Ютло, Р. Коэн, УФН 109, 371 (1973).
17. D. T. Farley, Jr., J. Geophys. Res. 68, 401 (1963).
А. В. Гуревич, Геомагн. и аэронав. 5, 70 (1965); 7, 291 (1967).
G. Meltz, R. E. Lelevier, J. Geophys. Res. 76, 6406 (1970).
18. W. E. Gordon, H. C. Carlson, Jr., Radio Sci. 9, 1041 (1974).
19. W. F. Utlaut, E. G. Violette, A. K. Paul, J. Geophys. Res. 75, 6429 (1970).
C. L. Rufenach, ibid. 78, 5611 (1973);
J. W. Wright, ibid., p. 5622.
В. В. Беликович и др. УФН 113, 732 (1974).
G. D. Thome, D. W. Blood, Radio Sci. 9, 917 (1974).
20. А. Г. Литвак, Изв. вузов, сер. «Радиофизика» 11, 1433 (1968).
В. В. Васьков, А. В. Гуревич, Письма ЖЭТФ 26, 529 (1974); Изв. вузов, сер. «Радиофизика» 18, 1261 (1975).
F. W. Perkins, E. J. Valeo, Phys. Rev. Lett. 32, 124 (1974).
В. С. Абрамович, Изв. вузов, сер. «Радиофизика» 19, 329 (1976).
21. P. A. Fialer, Radio Sci. 9, 923 (1974),
J. Minkoff, P. Kugelman, I. Weissman, ibid., p. 941,
G. B. Carpenter, ibid., p. 965.
22. G. H. Barry, ibid., p. 1025.
А. В. Гуревич, УФН 117, 186 (1975).
23. А. В. Гуревич, Е. Е. Цедиллина, УФН 116, 540 (1975); Геомагн. и аэронав. 15, 1005 (1975).
24. R. Cohen, J. D. Whitehead, J. Geophys. Res. 75, 6439 (1970).
Г. Г. Гетманцев, Н. П. Комраков, П. П. Коробков, Л. Ф. МIRONENKO, Н. А. Митяков, В. О. Рапопорт, В. Ю. Трахтенгерц, В. Л. Фролов, В. А. Череповицкий, Письма ЖЭТФ 18, 621 (1973).
Н. А. Митяков, В. О. Рапопорт, В. Ю. Трахтенгерц, Изв. вузов, сер. «Радиофизика» 18, 1273 (1975).
В. В. Васьков, А. В. Гуревич, Препринт ФИАН СССР № 95, Москва, 1975; Физ. плазмы 2, 113 (1976).
25. В. В. Васьков, А. В. Гуревич, ЖЭТФ 69, 176 (1975).
26. F. W. Perkins, Radio Sci. 9, 1065 (1974).
С. М. Грач, В. Ю. Трахтенгерц, Изв. вузов, сер. «Радиофизика» 18, 1288 (1975).
Н. Д. Борисов, В. В. Васьков, А. В. Гуревич, Физ. плазмы 2, 986 (1976).
27. H. C. Carlson, W. E. Gordon, R. L. Showen, J. Geophys. Res. 77, 199 (1974).
J. C. Haslett, L. R. Megill, Radio Sci. 9, 1005 (1974).
28. F. W. Perkins, P. K. Kaw, J. Geophys. Res. 76, 282 (1971),
F. W. Perkins, C. Oberman, E. J. Valeo, ibid. 79, 1478 (1974),

- J. Weinstock, Radio Sci. 9, 1085 (1974),
Н. А. Митяков, В. О. Рапопорт, В. Ю. Трахтенгерц, Изв. вузов, сер. «Радиофизика» 78, 27 (1975).
29. В. В. Васьков, Г. Г. Гетманцев, В. С. Караванов, Ю. С. Коробков, Н. А. Митяков, В. О. Рапопорт, В. А. Рыжов, В. Ю. Трахтенгерц, И. С. Шлюгер, К. И. Юрин, *ibid.*, стр. 1426.
30. В. В. Васьков, А. В. Гуревич, ЖЭТФ 64, 1277 (1973); Геомагн. и аэроном. 15, 235, 412, 633 (1975).
Г. М. Жислин, А. Г. Литвак, Н. А. Митяков, В. И. Петрухина, В. О. Рапопорт, В. Ю. Трахтенгерц, Письма ЖЭТФ 26, 617 (1974).
31. В. В. Беликович, Е. А. Бенедиктов, Г. Г. Гетманцев, Ю. А. Игнатъев, Г. П. Комраков, *ibid.* 22, 497 (1975).