

551.510.535(048)

**НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОТДЕЛЕНИЯ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ  
И АСТРОНОМИИ АКАДЕМИИ НАУК СССР  
(20 — 21 марта 1974 г.)**

20 и 21 марта 1974 г. в конференц-зале Института физических проблем АН СССР состоялась научная сессия Отделения общей физики и астрономии АН СССР. На сессии были заслушаны доклады:

1. А. В. Гуревич, Нелинейные явления при распространении радиоволн высокой мощности в ионосфере.

2. И. С. Шлюгер. Экспериментальное исследование нелинейных эффектов в  $E$ - и  $F$ -слоях ионосферы.

3. В. В. Васильков, А. В. Гуревич. Возбуждение неустойчивости  $F$ -области ионосферы в поле мощных радиоволн.

4. В. В. Беликович, Е. А. Бенедиктов, Г. Г. Гетманцев, Л. М. Ерухимов, Н. А. Зуйков, Г. П. Комраков, Ю. С. Коробков, Д. С. Котик, Н. А. Митяков, В. О. Рапопорт, Ю. А. Сазонов, В. Ю. Трахтенгерц, В. Л. Фролов, В. А. Череповицкий. Нелинейные явления в верхней ионосфере.

5. С. М. Грач, А. Г. Литвак, Н. А. Митяков, В. О. Рапопорт, В. Ю. Трахтенгерц. К теории нелинейных эффектов в ионосфере.

6. А. Б. Шварцбург. Отражение сильных радиоволн от ионосферы.

Ниже публикуется краткое содержание прочитанных докладов.

551.510.535(048)

**А. В. Гуревич.** Нелинейные явления при распространении радиоволн высокой мощности в ионосфере. Дается краткий обзор современного состояния вопроса. Люксембург—Горьковский эффект или кросс-модуляция радиоволн, взаимодействующих в нижней ионосфере (на высотах  $z \sim 80 - 100$  км) и не сильно возмущающих ионосферную плазму, систематически исследованы еще в 40-х годах<sup>1</sup>. В последнее время в связи с ростом мощности и направленности радиоизлучения стал возможен очень сильный нагрев электронов в нижней ионосфере: под действием электрического поля волны температура электронов может увеличиться на порядок. При распространении таких «сильных» радиоволн нелинейные эффекты играют определяющую роль. Теория этих явлений изложена в<sup>2</sup>, их подробное экспериментальное исследование проведено в<sup>3</sup>.

Появилась также возможность осуществить значительное возмущение верхней ионосферы на высотах максимума  $F$ -слоя (250—300 км). Наиболее силен эффект в окрестности точки отражения радиоволн. При этом не только нагреваются электроны, но и изменяется распределение их концентрации, что приводит к сильному искажению характера распространения радиоволн. Особую роль здесь играет возбуждение параметрической неустойчивости. Возникающие при этом явления в целом носят сложный характер. Их теоретические и экспериментальные исследования в настоящее время интенсивно развиваются<sup>3, 4</sup>.

## ЛИТЕРАТУРА

1. L. Никлеу, J. Ratcliffe, Proc. Electr. Eng. 96 (pt. II), 443 (1949).
2. В. Л. Гнизбург, А. В. Гуревич, УФН 70, 201, 393 (1960); А. В. Гуревич, А. Б. Шварцбург, Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере, М., «Наука», 1973.
3. И. С. Шлюгер, УФН 113, 729 (1974) (см. эту же страницу журнала).
4. У. Ютло, Р. Коэн, 109, 371 (1973); Г. Г. Гетманцев, Г. П. Комраков, Ю. С., Коробков, Л. Ф. Мироненко, Н. А. Митяков, В. О. Рапопорт, В. Ю. Трахтенгерц, В. Л. Фролов, В. А. Череповицкий, Письма ЖЭТФ 18, 621 (1973); И. С. Шлюгер, *ibid.* 19, 274 (1974).

551.510.535(048)

**И. С. Шлюгер.** Экспериментальное исследование нелинейных эффектов в  $E$ - и  $F$ -слоях ионосферы. Излагаются результаты исследования нелинейных эффектов, возникающих при зондировании ионосферы мощными радиоимпульсами. Измерения проводились в 1961—1968 гг. Импульсы имели почти прямоугольную форму, их длительность —  $5 \cdot 10^{-4}$  сек. Частота следования импульсов — 25 гц. Импульсы заполнялись частотой  $\omega = 8,5 \cdot 10^6$  гц, близкой к локальной гиромангнитной частоте электронов. Поляризация волны строго фиксировалась — обыкновенная либо необыкновенная волна. Мощность излучения могла непрерывно изменяться в течение 15—20 сек от минимального значения — 20 дб до максимального значения 0 дб. При максимальной эффективной мощности излучателя амплитуда поля обыкновенной волны на высотах порядка 100 км превышала характерное значение плазменного поля  $E_p^1$  в 5—6 раз.

Исследовалось самовоздействие мощного импульса в ионосфере и его взаимодействие с другими радиоволнами импульсного и непрерывного излучения. Самовоздействие проявилось в сильном искажении формы отраженного от ионосферы импульса. Дело в том, что начальная часть импульса распространяется в невозмущенной или слабо возмущенной ионосфере (так как за время меньше  $10^{-4}$  сек ионосфера не успевает сильно измениться). При  $t \gtrsim 10^{-4}$  сек амплитуда отраженного импульса быстро изменяется со временем из-за изменений, возникающих в ионосфере, и за время  $t \sim 2 \cdot 10^{-4}$  сек выходит на уровень, близкий к стационарному. Это изменение амплитуды отраженного импульса и является следствием его самовоздействия в ионосфере. С ростом мощности излучения эффекты самовоздействия усиливались. При этом в случае обыкновенной волны днем стационарный уровень отраженного от ионосферы сигнала не возрастал с ростом мощности излучения (эффект «насыщения»). Дополнительное нелинейное поглощение в этом случае днем достигало  $\sim 20$  дб, ночью 4—5 дб. Для необыкновенной волны при не слишком высоких мощностях (меньше — 10 дб) ее поглощение, напротив, уменьшалось с ростом мощности излучения (эффект «просветления» плазмы).

Изучалось взаимодействие мощного импульса с радиоволнами непрерывного излучения на частотах  $f^{(1)} = 254$  кгц и  $f^{(2)} = 394$  кгц. Наблюдалось сильное изменение амплитуд волн  $f^{(1,2)}$  под воздействием возмущающего импульса. Так, при максимальной мощности возмущающего импульса амплитуда волны  $f^{(2)}$  ослабевала в 10—20 раз, что соответствует нелинейному поглощению 20—25 дб (эффект «подавления»). На частоте  $f^{(1)}$  при определенных условиях наблюдалось, напротив, усиление отраженной волны под действием мощного импульса («просветление» плазмы). Отметим, что и при взаимодействии двух волн непрерывного излучения наблюдалась глубокая кросс-модуляция (до 70%), сопровождаемая сильным искажением формы кросс-модуляции и даже удвоением частоты модуляции (эффект «перемодуляции»).

Кросс-модуляция коротких импульсов, т. е. взаимодействие мощного импульса с другим импульсом  $f$  длительностью  $10^{-4}$  сек, изучалась в широком диапазоне частот  $f$ : от 0,5 до 6 Мгц. На частотах  $f \leq 1 - 2$  Мгц в дневное и вечернее время глубина кросс-модуляции доходила до 90%, в послеполуночные часы она падала до 10—30%. С увеличением частоты  $f$  глубина кросс-модуляции убывала, однако и при максимальных частотах  $f \sim 5-6$  Мгц она достигала днем 30—40%. Установлен резко нелинейный ход глубины кросс-модуляции в зависимости от мощности возмущающей станции и ее значительная нерегулярная изменчивость во времени. Построены средние почасовые, суточные и сезонные значения глубины кросс-модуляции  $\mu$  и ее флуктуаций  $\sqrt{(\mu - \bar{\mu})^2}$  для разных частот  $f$  и при разной мощности возмущающего импульса.

Наблюдаемые эффекты самовоздействия и взаимодействия радиоволн высокой мощности, в том числе качественные эффекты («насыщение», «просветление», «подавление», «перемодуляция»), хорошо согласуются с результатами теоретических расчетов<sup>1</sup>, учитывающих изменение частоты соударений электронов в ионосфере из-за их

нагревания в поле мощного импульса. Изучение временных изменений амплитуды поля при самовоздействии и взаимодействии волн позволяет исследовать нестационарные процессы нагревания и релаксации температуры электронов в ионосфере. Детальное сопоставление с теорией показывает, что в проведенных экспериментах температура электронов в нижней ионосфере на высотах 80—100 км возрастала под воздействием мощного импульса в  $\sim 10$ —20 раз.

Установлено также заметное изменение концентрации электронов в  $E$ -слое: в период действия мощной станции увеличивалась частота появления спорадического слоя  $E_s$  и в среднем на 10—20% возрастала предельная частота  $E_s$ -слоя.

Особое явление наблюдалось в ночное время при отражении обыкновенной волны от  $F$ -слоя ионосферы<sup>2</sup>. В этом случае, начиная с некоторой критической мощности излучения, и одновременно возникали, а в дальнейшем интенсивно развивались сильные искажения формы огибающей импульса, т. е. наблюдалась глубокая амплитудная модуляция отраженного сигнала с частотой  $f_M \sim 5$  кГц. Указанные искажения формы импульса носили нерегулярный характер и быстро осциллировали во времени. Эти нестационарные явления, по-видимому, связаны с параметрическим возбуждением лэнгмюровских колебаний плазмы в области отражения импульса в  $F$ -слое ионосферы<sup>3</sup>.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. В. Гуревич, Радиотехн. и электрон. 1, 706 (1956); Изв. вузов (Радиофизика) 1, № 4, 24; № 5/6, 17 (1958); В. Л. Гинзбург, А. В. Гуревич, УФН 70, 201, 393 (1960); А. В. Гуревич, А. Б. Шварцбург, Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере, М., «Наука», 1973.
2. И. С. Шлюгер, Письма ЖЭТФ 19, 274 (1974).
3. В. В. Васьков, А. В. Гуревич, ЖЭТФ 64, 1272 (1973); Я. И. Альбер, З. Н. Кротова, Н. А. Митяков, В. О. Рапопорт, В. Ю. Трахтенгерц, ЖЭТФ 66, 574 (1974).

551.510.535(048)

**В. В. Васьков, А. В. Гуревич.** Возбуждение неустойчивости  $F$ -области ионосферы в поле мощных радиоволн. В связи с экспериментальным исследованием возбуждения верхней ионосферы мощными радиоволнами<sup>1</sup> существенный интерес представляет вопрос о раскачке колебаний и волн в ионосферной плазме. Наиболее эффективно неустойчивость возбуждается в области плазменных резонансов, когда частота радиоволны близка к одной из собственных частот плазмы. Так, при нормальном падении на плазму обыкновенной волны вблизи точки отражения ее частота  $\omega$  близка к лэнгмюровской частоте электронных колебаний плазмы  $\omega_0$ . В этой области возможна параметрическая раскачка плазменных и ионно-звуковых волн<sup>2</sup>.

Для возбуждения неустойчивости необходимо, чтобы амплитуда электрического поля волны  $E$  превосходила пороговое поле  $E_{п}$ <sup>2</sup>. В условиях ионосферы для обыкновенной волны поле  $E_{п}$  минимально на высотах  $h \sim 200$ —250 км: днем  $E_{п \min} \sim 300$  мВ/м,  $\omega_{\min} \sim 3 \cdot 10^7$  гц, ночью  $E_{п \min} \sim 30$  мВ/м,  $\omega_{\min} \sim 6 \cdot 10^6$  гц. На высоте максимума  $F$ -слоя поле  $E_{п}$  в 3—4 раза выше, чем  $E_{п \min}$ ; оно быстро увеличивается и в  $E$ -слое с уменьшением высоты. Неустойчивость возбуждается в максимумах поля радиоволны, т. е. в максимумах стоячей волны, образующейся вблизи точки отражения. Область неустойчивости занимает 1—5 км вниз от точки отражения, при этом возбуждается 10—100 максимумов. Эффективная длина генерируемых плазменных волн 0,2—1 м.

При возбуждении неустойчивости изменяются условия распространения в плазме радиоволны, вызвавшей возмущение. Это служит причиной ее самовоздействия. Важно, что в окрестности точки отражения эффекты самовоздействия также резонансно усиливаются. Действительно, в области, где  $\epsilon_0 \rightarrow 0$ , уже небольшие возмущения плазмы приводят к существенному изменению величины  $\epsilon$ , а следовательно, и к изменению структуры поля радиоволны. Это в свою очередь сильно сказывается на развитии неустойчивости<sup>3</sup>.

Возмущения  $\epsilon$  могут быть связаны как непосредственно с возбуждением колебаний плазмы, так и с общим изменением концентрации плазмы, вызванным ее вытеснением из нагреваемой области или изменением ионизационно-рекомбинационного баланса. Последний процесс в условиях  $F$ -слоя ионосферы характеризуется, однако, значительным временем  $\tau_N \sim 10$ —100 сек, и потому при рассмотрении начальной стадии развития неустойчивости им можно пренебречь, т. е. учитывать лишь возмущение  $\epsilon$ , связанное с возбуждением плазменных и ионно-звуковых волн.

Если возмущающая волна не слишком сильная:

$$\left(\frac{E_1}{E_{\text{п}}}\right)^2 \ll 4 \cdot 10^{-4} \frac{\omega}{v_e}, \quad (1)$$

то неустойчивость в условиях ионосферы носит кинетический характер (здесь  $v_e$  — эффективная частота столкновений электронов с тяжелыми частицами). В этом случае наиболее быстро нарастают колебания в главном (первом) максимуме стоячей волны с инкрементом

$$\gamma_1 = \frac{v_e}{2} \left[ \left(\frac{E_1}{E_{\text{п}}}\right)^2 - 1 \right],$$

где  $E_1$  — амплитуда поля в первом максимуме.

Пусть  $t$  — время, отсчитываемое от момента включения поля. При  $t < t_1$ , где  $t_1 = \tau_0/\gamma_1$ , колебания нарастают экспоненциально со временем: самовоздействие радиоволны и нелинейное взаимодействие между лэнгмюровскими волнами при этом несущественны. Параметр  $\tau_0$  определяется начальным уровнем шумов; в условиях ионосферы при начальном уровне теплового шума  $\tau_0 \sim 7 - 10$ .

При  $t > t_1$  становится существенным взаимодействие радиоволны с лэнгмюровскими шумами. Поскольку возмущения  $\epsilon$  при этом носят в основном диссипативный характер, вначале при  $t > t_1$  интенсивность волны резко падает за счет ее поглощения в первом максимуме. Однако уже при  $t - t_1 > 1/\gamma_1$  интенсивность отраженной волны, напротив, нарастает из-за того, что поле перестраивается и волна начинает отражаться от области сильно возбужденных колебаний. Образуется новая стоячая волна. Затем этот нестационарный процесс может повториться за счет возбуждения в следующем максимуме и т. д. К аналогичным нестационарным эффектам приводит и нелинейное взаимодействие между лэнгмюровскими волнами. Перекачка энергии по спектру лэнгмюровских волн сопровождается интенсивным возбуждением колебаний в отдельных узких спектральных областях — сателлитах. Благодаря слабому затуханию и этот процесс носит осцилляторный характер. Таким образом, структура возмущенной зоны в начальный период возбуждения носит существенно нестационарный характер. В результате отраженная от ионосферы волна на начальной стадии возбуждения плазмы оказывается глубоко промодулированной по амплитуде и фазе. Период модуляции  $T \sim (1 - 10)/\gamma_1$ . Возникающие колебания носят релаксационный характер<sup>3, 4</sup>. В условиях ионосферы  $T \sim 10^{-4} - 10^{-2}$  сек.

В установившемся состоянии возмущения диэлектрической проницаемости плазмы пропорциональны плотности энергии волны:  $\Delta \epsilon \sim (E^2 - E_{\text{п}}^2)$ . Решение волнового уравнения с учетом этого нелинейного возмущения  $\epsilon$  показывает, что благодаря самовоздействию сильно изменяется структура поля и возрастает поглощение волны в плазме. В условиях, когда обычное (линейное) поглощение невелико, главную роль играет аномальное (нелинейное) поглощение, связанное с возбуждением колебаний. Коэффициент отражения волны от плазмы при этом резко убывает с ростом ее мощности ( $\sim W^{-3}$ )<sup>5</sup>.

При больших амплитудах возмущающей волны условие (1) нарушается и неустойчивость перерастает в свою гидродинамическую фазу. Характерная особенность гидродинамической неустойчивости в условиях ионосферы — в том, что максимум инкремента колебаний  $\gamma$  теперь не совпадает с главным максимумом стоячей волны, а сдвигается вниз, приближаясь к нижней границе области неустойчивости. Благодаря этому при учете самовоздействия не только возникает модуляция радиоимпульса (как и в случае кинетической неустойчивости), но часть импульса может испытать заметную задержку, отразившись вверх от наиболее сильно возмущенного слоя  $\Delta \epsilon$  у границы области неустойчивости<sup>6</sup>.

Анализ эффектов самовоздействия, возникающих при длительном непрерывном воздействии радиоволны на ионосферу ( $t \gtrsim 10$  сек), показывает, что при учете нагревания электронов и изменения концентрации плазмы в области отражения обыкновенной волны в F-слое может развиваться неустойчивость самофокусирующего типа, приводящая к образованию неоднородной структуры в ионосфере. Характерный размер неоднородностей в плоскости, ортогональный к магнитному полю Земли  $H$ , порядка  $0,5 - 1$  км; в направлении вдоль  $H$  неоднородность растет со временем, достигая через время  $\sim 10$  сек размеров  $\sim 10$  км. Инкремент этой неустойчивости  $\gamma$  при не очень сильных полях  $E < E_{\text{п}}$  порядка  $1/\tau_{\text{т}}$ , где  $\tau_{\text{т}} \sim 1/8v_e$  — характерное время нагрева электронов (в F-слое ионосферы  $\tau_{\text{т}} \sim 20 - 40$  сек). С ростом амплитуды поля при  $E > E_{\text{п}}$   $\gamma$  резко возрастает, так что при  $E \sim 2E_{\text{п}}$  он уже на порядок выше, чем  $1/\tau_{\text{т}}$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. У. Ю тло, Р. Коэн, УФН 109, 371 (1973); Г. Г. Гетманцев, Г. П. Комраков, Ю. С. Коробков, Л. Ф. Мироненко, Н. А. Митяков, В. О. Рапопорт, В. Ю. Трахтенгерц, В. Л. Фролов, В. А. Череповицкий. Письма ЖЭТФ 18, 621 (1973); И. С. Шлюгер, *ibid.* 19, 274 (1974).

2. В. П. Силлин, УФН 108, 425 (1972); В. В. Васьков, А. В. Гуревич, Изв. вузов (Радиофизика) 16, 188 (1973).
3. В. В. Васьков, А. В. Гуревич, ЖЭТФ 64, 1273 (1973).
4. Я. И. Альбер, З. Н. Кротова, Н. А. Митяков, В. О. Рапопорт, В. Ю. Трахтенгерц, ЖЭТФ 66, 574 (1974).
5. В. В. Васьков, А. В. Гуревич, *ibid.*, стр. 1673; Phys. Lett. 45, 47 (1973).
6. В. В. Васьков, А. В. Гуревич, Геомагн. и аэронам. 15 (1975).

551.510.535(048)

В. В. Беликович, Е. А. Бенедиктов, Г. Г. Гетманцев, Л. М. Ерухимов, Н. А. Зуйков, Г. П. Комраков, Ю. С. Коробков, Д. С. Котик, Н. А. Митяков, В. О. Рапопорт, Ю. А. Сазонов, В. Ю. Трахтенгерц, В. Л. Фролов, В. А. Череповицкий. Нелинейные явления в верхней ионосфере. Возможность нагрева верхней ионосферы мощным радиоизлучением была указана в 1960 г. Гинзбургом и Гуревичем<sup>1</sup>.

Позднее Фарли<sup>2</sup> и Гуревич<sup>3</sup> привели количественные оценки изменений температуры и концентрации электронов.

Первые эксперименты по воздействию излучения мощного коротковолнового радиопередатчика на F-слой были выполнены в Боулдере и Аресибо в 1970 г.<sup>4</sup>. Аналогичная установка была создана в 1972 г. в НИРФИ (г. Горький). Радиопередатчик имеет среднюю мощность  $P \sim 130$  кВт и работает как в непрерывном, так и в импульсном режиме на частоте 5,75 мГц. Радиоволны с правой и левой круговой поляризацией излучаются вертикально вверх антенной с коэффициентом усиления  $G \sim 150$ . Для диагностики состояния F-слоя используется вспомогательная ионосферная станция и аппаратура для регистрации радиоизлучения дискретных источников на частотах 9 и 25 МГц. Краткие сведения о некоторых результатах, полученных в 1973 г., опубликованы в работе<sup>5</sup>. При включении мощной станции наблюдается уменьшение интенсивности отраженных от ионосферы пробных волн (с частотами, близкими к частоте мощной станции) в 3—10 раз с характерными временами от 30 до 2 сек в зависимости от мощности передатчика. При выключении мощного радиопередатчика пробные сигналы восстанавливались примерно за те же характерные времена. Зависимости степени ослабления пробных волн и характерных времен падения напряженности поля пробных волн от мощности передатчика приведены на рис. 1. При расстройке частоты пробных волн на несколько сотен килогерц от 5,75 МГц эффект аномального ослабления пробной волны заметно уменьшался. Кроме того, наблюдался еще целый ряд своеобразных нелинейных эффектов. В частности, когда критическая частота была близка к частоте 5,75 МГц, наблюдалось резкое увеличение диффузности отраженных от ионосферы сигналов.

Во время описываемых экспериментов производилась запись радиоизлучения дискретного источника Кассиопея на частотах 25 и 9 МГц, когда источник находился в зоне диаграммы направленности антенны мощного радиопередатчика. Примеры записей источника на обеих частотах приведены на рис. 2. Вертикальной линией отмечен момент включения мощного передатчика, а стрелкой — момент его выключения. Для частоты 25 МГц характерен рост мелкомасштабных ионосферных мерцаний (рис. 2, а) или же крупномасштабные вариации интенсивности (рис. 2, б) (см. также<sup>6</sup>). На частоте 9 МГц характерно резкое падение интенсивности источника (рис. 2, в). Все указанные выше явления имели место лишь в тех случаях, когда критическая частота F-слоя была выше 5,75 МГц.

В процессе экспериментов наблюдались также различные эффекты появления комбинационных частот, связанных с квадратичной нелинейностью, на существование которых было указано в статье<sup>1</sup>. Так, при синусоидальной модуляции сигнала мощного радиопередатчика с частотой  $\Omega \ll 5,75$  МГц был зарегистрирован сигнал ионосфер-

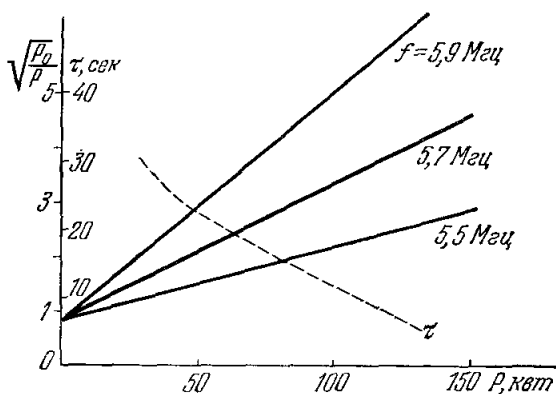


Рис. 1.

ного происхождения с частотой  $\Omega$  и интенсивностью, соответствующей количественным расчетам, выполненным совместно с В. Я. Эйрманом и В. В. Тамойкиным.

Характер наблюдавшихся нелинейных эффектов заставляет предположить, что помимо нагрева ионосферы мощным радиоизлучением в возмущенной области имеет место турбулизация плазмы, связанная с появлением различного вида неустойчивостей. Более подробно этот вопрос рассмотрен в докладе <sup>7</sup>.

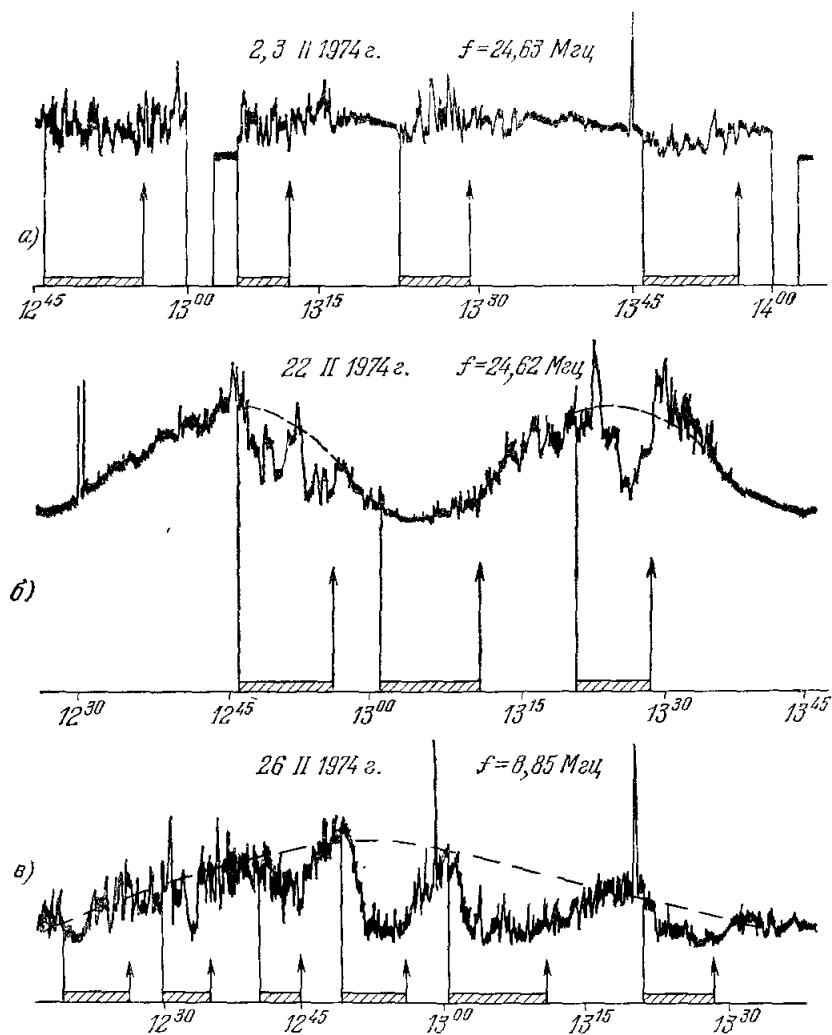


Рис. 2.

В 1970 г. в НИРФИ были проведены также наблюдения искусственных сигналов на частоте 15 мГц, распространяющихся магнитосферным путем. Приемник и передатчик располагались практически в одном пункте с  $L \approx 2,6$  ( $L$  — параметр Мак-Илвейна).

Из наиболее характерных особенностей обратного эха можно отметить значительное (до 50 гц) уширение спектра с асимметрией в сторону высоких частот и амплитудную модуляцию сигнала. В ряде сеансов была обнаружена зависимость интенсивности отраженного сигнала от длительности посылок. Часто до прихода основного сигнала наблюдался «предвестник», задержка которого по отношению к зондирующему сигналу плавно менялась в пределах 0,2—0,6 сек с характерным временем около 2 мин (что соответствует скорости перемещения отражающей области  $\sim 1000$  км/сек). Некоторые теоретические соображения по поводу этого эксперимента также приводятся в докладе <sup>7</sup>.

## ЛИТЕРАТУРА

1. В. Л. Гинзбург, А. В. Гуревич, УФН 70, 201, 393 (1960).
2. D. T. Farley, J. Geophys. Res. 68, 401 (1963).
3. А. В. Гуревич, Геомагн. и аэроном. 7, 291 (1967).
4. У. Ю. Тло, Р. Коэн, УФН 109, 371 (1973).
5. Г. Г. Гетманцев, Г. П. Комраков, Ю. С. Коробков, Л. Ф. Мироненко, Н. А. Митяков, В. О. Рапопорт, В. Ю. Трахтенгерц, В. Л. Фролов, В. А. Череповицкий, Письма ЖЭТФ 18, 621 (1973).
6. C. L. Rifebach, J. Geophys. Res. 78, 5611 (1973).
7. С. М. Грач, А. Г. Литвак, Н. А. Митяков, В. О. Рапопорт, В. Ю. Трахтенгерц, УФН 113, 734 (1974) (см. эту же страницу журнала).

551.510.535(048)

**С. М. Грач, А. Г. Литвак, Н. А. Митяков, В. О. Рапопорт, В. Ю. Трахтенгерц.** Теории нелинейных эффектов в ионосфере. Эксперименты по воздействию мощного радиоизлучения на ионосферную плазму инициировали целый ряд теоретических исследований нелинейных явлений в ионосфере.

Во многом эти работы находятся в общем русле исследований по теории нелинейных явлений в плазме. Однако к настоящему времени уже определился и круг новых задач, диктуемый, с одной стороны, спецификой ионосферных условий, а с другой — часто неожиданными результатами ионосферного эксперимента.

Существенную роль в  $F$ -слое ионосферы играет параметрическая неустойчивость, которая, как известно, проявляется в эффектах нелинейной трансформации вблизи точки отражения падающей электромагнитной волны в плазменные колебания. Сравнительно простую теорию параметрической неустойчивости удается построить для небольших плотностей энергии  $W_t$  волны накачки,  $W_t/NT_e < (m/M)^{1/2} k e r_D$  ( $N$  и  $T_e$  — концентрация и температура электронов,  $m$  и  $M$  — массы электронов и ионов,  $k$  — волновое число плазменных волн,  $r_D$  — дебаевский радиус). В этом случае спектр плазменной турбулентности формируется в процессе нелинейной перекачки энергии по спектру в сторону крупных масштабов благодаря эффектам индуцированного рассеяния на ионах<sup>1-4</sup>. Как показывают расчеты на ЭВМ<sup>4</sup>, спектры плазменных волн очень нестационарны и состоят из отдельных узких линий.

Интенсивный отвод энергии из волны накачки в плазменные колебания приводит к эффектам самовоздействия, которые проявляются в амплитудной модуляции и ослаблении исходного сигнала<sup>4</sup>.

Развитая теория удовлетворительно объясняет результаты эксперимента по локализации плазменных волн, возникавших при облучении ионосферы мощным передатчиком в Аресибо (США)<sup>5</sup>.

Развитие параметрической неустойчивости сопровождается еще одним важным эффектом — генерацией быстрых электронов при ускорении на плазменных волнах. Как показывают оценки, выполненные на основе квазилинейной теории, уже при существующих мощностях может появиться заметный поток быстрых электронов с энергией  $> 10$  эв. По-видимому, появление быстрых электронов косвенно было зарегистрировано в американских экспериментах<sup>6</sup>.

Теория существенным образом модифицируется при увеличении амплитуды волны накачки, когда  $W_t/NT_e > k e r_D^2$ . Численные расчеты выявили ряд качественных особенностей этой стадии. В процессе развития неустойчивости формируются сильно нелинейные стоячие плазменные волны с широким спектром пространственных масштабов. При этом возникает интенсивная нелинейная перекачка в сторону малых масштабов, и преобладающей становится бесстолкновительная диссипация. Существенно, что процесс является динамическим (квазипериодическим). Чтобы приблизиться к ионосферным условиям, описанный выше режим был рассмотрен при падении электромагнитного импульса на конечный слой плазмы. Согласно численным расчетам происходит интенсивное накопление плазменных волн и низкочастотных возмущений в слое, а импульс на выходе из слоя оказывается промодулированным по амплитуде. Возникает также удлинение электромагнитного импульса, обусловленное эффектами «высвечивания» накопившихся в слое плазменных волн после выключения поля накачки\*).

Эффекты модуляции и удлинения импульса наблюдались экспериментально<sup>8</sup>. Рассмотренные выше эффекты характеризуют быстрые процессы при параметрической неустойчивости. Их временные масштабы в условиях ионосферы составляют  $10^{-3} - 1$  сек.

\*) Возможно и другое объяснение амплитудной модуляции и удлинения импульса, связанное с эффектами нелинейной стратификации<sup>7</sup>.

В то же время эксперименты<sup>6, 9</sup> свидетельствуют о том, что наиболее существенные изменения ионосферы возникают за более длительные времена. По-видимому, в ионосфере происходит накопление крупномасштабных возмущений, которые кардинальным образом меняют условия распространения радиоволн. Количественное объяснение этих эффектов в настоящее время является первоочередной задачей дальнейших теоретических исследований.

Интересные нелинейные эффекты обнаруживаются в диапазоне низких частот  $f \approx 10 - 100$  кГц. Часть из них обусловлена взаимодействием с энергичными частицами радиационных поясов. В то же время на ионосферных высотах  $h \approx 500 - 2000$  км возможны явления, аналогичные нелинейным эффектам в коротковолновом диапазоне. Как показывают расчеты, в условиях экспериментов с низкочастотными передатчиками<sup>9</sup> выполняются критерии параметрической неустойчивости для низкочастотных сигналов. Следствием этого могут служить эффекты амплитудной модуляции и уширения частотного спектра исходной волны, а также захвата сигнала в искусственные волноводы<sup>10</sup>.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. W. L. Kruer, E. J. Valeo, Princeton University Report MATT-919, 1972.
2. J. A. Fejer, Yu-Yun Kuo. Phys. Fluids 16, 1490 (1973).
3. N. A. Mityakov, V. O. Rapoport, V. Yu. Trakhtengertz, Planet. and Space Sci. 22, 95 (1974); Геомагн. и аэроном. 14 (1) (1974).
4. Я. И. Альбер, Э. П. Кротова, Н. А. Митяков, В. О. Рапопорт, В. Ю. Трахтенгерц. ЖЭТФ 66, 574 (1974).
5. A. J. Wong, R. J. Taylor, Phys. Rev. Lett. 27, 644 (1971); H. C. Carlson, W. E. Gordon, R. L. Showen, J. Geophys. Res. 77, 4242 (1972).
6. У. Ютло, Р. Коэн, УФН 199, 371 (1973).
7. В. В. Васьков, А. В. Гуревич. УФН 113, 730 (1974) (см. этот же номер журнала).
8. H. C. Шлюгер, *ibid.*, стр. 723 (см. этот же номер журнала).
9. В. В. Беликович, Е. А. Бенедиктов и др. УФН 113, 732 (1974) (см. этот же номер журнала).
10. О. А. Молчанов, В. Ю. Трахтенгерц, В. М. Чмырев, Изв. вузов (Радиофизика) 17(2)(1974).

551.510.535(048)

**А. Б. Шварцбург.** Отражение сильных радиоволн от ионосферы. При исследовании комплекса явлений в поле мощных радиоволн в ионосфере особый интерес вызывает область отражения радиоволн от ионосферы. Такой интерес обусловлен прежде всего значительным увеличением амплитуды поля вблизи точки отражения. Кроме того, возмущения показателя преломления, связанные с действием поля волны, развиваются в области отражения; поэтому такие возмущения могут привести к заметному искажению поля стоячей радиоволны.

В области отражения удобно выделить две физически различные ситуации:

а) Образование и воздействие на волну медленных (нерезонансных) возмущений, связанных с нагревом плазмы и с изменением электронной концентрации в возмущенной зоне.

б) Возникновение и развитие быстрых (резонансных) процессов, связанных с возбуждением собственных высокочастотных колебаний в ионосферной плазме.

Оба типа возмущений существенно различаются не только характерными временами развития, но и амплитудами полей и пространственной структурой возмущенной области.

1. При развитии тепловой нелинейности в области отражения вертикально падающего пучка от слоя  $E$  возможно создание искусственной неоднородности, связанной с нарушением ионизационно-рекомбинационного баланса в плазме, нагреваемой волной. Из-за высокой частоты столкновений «диффузионная длина»  $L_N$  в этой области невелика ( $L_N \sim 20-40$  м) и распределение возмущения в горизонтальной плоскости в основном повторяет амплитудный профиль пучка<sup>1</sup>. Такая неоднородность может привести к дополнительному рассеянию волн, падающих на возмущенную область.

Особый интерес могут представить эффекты, связанные с развитием теплового возмущения в «резонансных» областях ионосферы — вблизи максимума слоя и при отражении от области, где близки фазовые скорости обыкновенной и необыкновенной волн. В частности, в результате нелинейного эффекта слой  $E$  оказывает запирающее влияние на волну с частотой выше критической частоты слоя. Так, при  $\Delta\omega/\omega_K \ll 10^{-3}$  ( $\omega_K$  — критическая частота слоя,  $\Delta\omega = \omega_K - \omega$ ) доля энергии, отраженной от слоя, возрастает на порядок при возрастании мощности до  $W \approx 200$  квт. В области, где в «линейной» теории возможно утраивание отраженных сигналов<sup>2</sup>, небольшие измене-



ния вертикального градиента концентрации вблизи точки отражения мощной радиоволны могут привести к заметному изменению уровня дополнительного отраженного сигнала.

При наклонном зондировании возникают дополнительные «резонансные» ситуации, связанные, в частности, с распространением волны в плоскости магнитного меридиана под углом, близким к критическому<sup>2</sup>. Однако анализ нелинейных эффектов в таком резонансе затрудняется из-за отсутствия соответствующей аналитической техники.

2. При развитии резонансных эффектов (типа параметрической неустойчивости) происходит дополнительное рассеяние радиоволны на развивающихся колебаниях. При этом длинноволновая часть спектра колебаний ( $\lambda \approx 100$  м) может стать источником направленного рассеяния на возмущениях плотности, вызванных самой волной<sup>3</sup>. Это может привести к «мерцанию» рассеянного высокочастотного сигнала со звуковой частотой и к появлению «рассеяния вбок». При отражении мощной волны вблизи максимума *F*-слоя такое отклонение рассеянного луча от вертикали составит 60—80 км. При этом, в отличие от тепловой нелинейности, размеры возмущенной области на начальной стадии эволюции колебаний определяются превышением амплитуды поля над порогом неустойчивости.

3. Геомагнитное поле оказывает существенное влияние на развитие параметрической неустойчивости в ионосфере. Особенно заметно сказывается роль поля при возбуждении колебаний в области отражения необыкновенной волны. В этом случае колебания возбуждаются при вертикальном зондировании лишь в достаточно разреженной плазме<sup>4</sup> ( $\Omega_e^2 < 2\omega_H^2$ ,  $\Omega_e$  и  $\omega_H$  — лэнгмюровская и гирочастота электронов), т. е. на высотах 150—250 км, и преимущественно ночью. Порог возбуждения составляет 30—60 мВ/м. Для одной и той же частоты ( $\omega \sim 1 - 3$  МГц) порог возбуждения для обыкновенной компоненты может быть в 3—10 раз больше, чем для необыкновенной, так как обыкновенная компонента отражается в *E*-слое, а необыкновенная выше — в начале *F*-слоя.

При наклонном зондировании круг резонансных ситуаций изменяется. На высотах  $z < 200$  км условия возбуждения неустойчивости (близость частоты волны к одной из частот собственных колебаний) выполнены в основном для обыкновенной поляризации, на больших высотах возможны резонансы и в поле необыкновенной волны<sup>5</sup>. Эти данные относятся к случаю, когда зондирование ведется перпендикулярно к плоскости магнитного меридиана. При наклонном зондировании в плоскости меридиана возбуждение неустойчивостей приобрело бы особый интерес, так как это может привести к дополнительному рассеянию волн<sup>2</sup>, что может оказаться существенным для эффекта утраивания отраженных сигналов.

Таким образом, при исследовании нелинейных явлений в области отражения сильных радиоволн от ионосферы круг возможных эффектов при наклонном зондировании и учете геомагнитного поля значительно расширяется.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. Б. Шварцбург, ДАН СССР 215(4)(1974).
2. В. Л. Гинзбург, Распространение электромагнитных волн в плазме, М., «Наука», 1967.
3. А. Б. Шварцбург, ДАН СССР 212(4)(1974).
4. А. Б. Шварцбург, Геомагн. и аэронав. 14, 35 (1974).
5. А. Б. Шварцбург, *ibid.* 13, 925 (1973).