

Качественно результаты эксперимента согласуются с теоретическими расчетами генерации СКЧ на основе механизма, связанного с модуляцией естественных ионосферных токов [3]. Количественное сравнение экспериментальных и теоретических результатов проведено на основе численного моделирования генерации СКЧ путем решения граничной задачи для неоднородных уравнений Максвелла:

$$\nabla \times \mathbf{E} = c^{-1} \partial \mathbf{H} / \partial t, \quad D = \hat{\epsilon}_0 \mathbf{E},$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = c^{-1} \partial D / \partial t + 4\pi c^{-1} \mathbf{j}_{nl}. \quad \mathbf{j}_{nl} = \delta \hat{\sigma} \mathbf{E}_0.$$

Здесь $\hat{\epsilon}_0$, \mathbf{E}_0 — тензор диэлектрической проницаемости и электрическое поле на нулевой частоте, \mathbf{E} , \mathbf{H} , \mathbf{j}_{nl} , $\delta \hat{\sigma}$ — электрическое и магнитное поля, нелинейный ток и изменение проводимости на частоте модуляции. В качестве граничных условий задачи использовались импедансные условия на поверхности Земли и условия излучения на высоте $z = 100$ км. Методика решения задачи приведена в работе [4].

Изменения $\hat{\epsilon}_0(z)$ и $\mathbf{j}_{nl}(z)$ при $z < 100$ км, обусловленные вариациями электронной концентрации $n(z)$ и поля \mathbf{E}_0 в каждом конкретном событии, приводят к изменениям поляризации полей СКЧ. При решении задачи использовалась модель с экспоненциальной зависимостью электронной концентрации от высоты. Параметры модели выбирались по данным риометрического поглощения. Для определения поля \mathbf{E}_0 использовались данные МВС при заданном отношении интегральных холловской и педерсеновской проводимостей, равном 3. Результаты расчетов показаны на рис 2 (сплошная линия).

Рассмотренная связь поляризации СКЧ с параметрами ионосферы, качественно и количественно согласующаяся с теорией, значительно расширяет возможности искусственного низкочастотного излучения при диагностике физических процессов в ионосфере.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гетманцев Г. Г., Зуйков Н. А., Котик Д. С. и др. — Письма в ЖЭТФ, 1974, 20, вып. 4, с. 229.
2. Капустин И. Н., Перцовский Р. А., Васильев А. Н. и др. — Письма в ЖЭТФ, 1977, 25, вып. 5, с. 248.
3. Котик Д. С., Трахтенгерц В. Ю. — Письма в ЖЭТФ, 1975, 21, вып. 2, с. 114.
4. Ларин В. Ф., Остапенко А. А., Смирнов В. С. — Изв. вузов — Радиофизика, 1982, 25, № 4, с. 378.

Полярный геофизический институт
Кольского филиала АН СССР

Поступила в редакцию
11 мая 1983 г.

УДК 551.510.535

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ЯВЛЕНИЯ ГИСТЕРЕЗИСА ПРИ ИСКУССТВЕННОМ ВОЗМУЩЕНИИ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ

*В. А. Алабастров, Е. А. Бенедиктов, В. Н. Иванов, Ю. А. Игнатъев,
С. М. Савельев, А. С. Терехов*

В статье приводятся результаты эксперимента по исследованию явления гистерезиса при воздействии на ионосферу мощным КВ излучением. Особенностью данного эксперимента по сравнению с известными [1, 2] являлось использование для диагностики искусственной ионосферной турбулентности (ИИТ) метода наклонного радиозондирования. Регистрация сигналов обратного рассеяния (СОР) в широком секторе углов в азимутальной плоскости позволила исследовать особенности возбуждения ИИТ, включая поведение пространственных размеров области возмущения при различной мощности передатчика нагрева.

Эксперимент проведен в августе 1980 года. Для нагрева ионосферы использовался мощный КВ передатчик (максимальная мощность 150 кВт).

Антенна передатчика имела КНД порядка 100. Нагрев ионосферы осуществлялся на частоте 4,6 МГц в непрерывном режиме излучения. Режим работы передатчика нагрева состоял из циклов: 3 минуты — нагрев, 4 минуты — пауза. В период работы передатчика нагрева мощность (P_n) изменялась в соответствии с графиком, приведенным на рис. 1а.

Радиозондирование ИИТ осуществлялось с помощью приемопередатчика, расположенного на удалении 1300 км от передатчика нагрева. Передатчик пробных волн

мощностью порядка 100 кВт излучал радиоимпульсы длительностью $0,8 \text{ мс}$. Антенна передатчика пробных волн была ориентирована на пункт расположения передатчика нагрева и имела ширину в азимутальной плоскости по уровню половинной мощности $40\text{--}50^\circ$. Приемник комплекса позволил осуществить прием и регистрацию СОР по девяти азимутальным направлениям параллельно. Суммарный угловой сектор приема в азимутальной плоскости составлял примерно 50° .

В эксперименте измерения проводились на фиксированной частоте, равной 20 МГц . Данная частота была выбрана на основе результатов измерений интенсивности СОР в широком диапазоне частот, которые были проведены непосредственно перед началом эксперимента по исследованию гистерезиса в цикле нагрева, в котором мощность передатчика нагрева была постоянной и равнялась 150 кВт . При этом в качестве рабочей частоты была выбрана частота, на которой уровень СОР был максимален. Таким образом, в эксперименте исследовались особенности возбуждения искусственных неоднородностей с поперечным масштабом $l_{\perp} = 7,5 \text{ м}$.

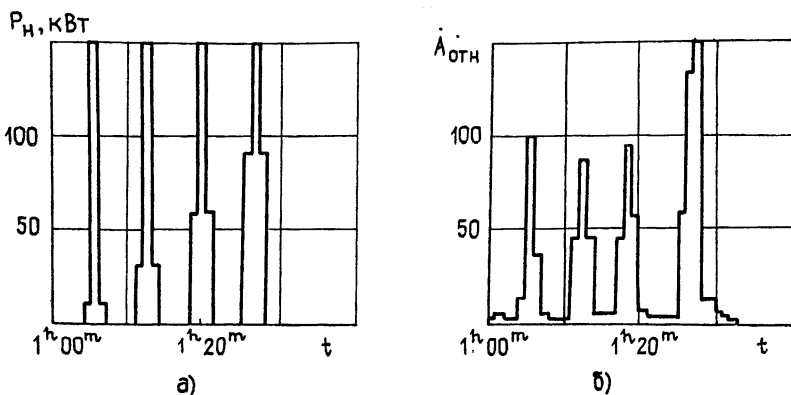


Рис. 1.

Регистрация СОР проводилась спустя $10\text{--}20 \text{ с}$ после очередного переключения мощности передатчика нагрева. В период паузы такт измерения также составлял одну минуту. На рис. 16 приведены вариации во времени уровня СОР (A_{OTN}), наблюдавшиеся при приеме на антенну, ориентированную в азимутальной плоскости непосредственно на передатчик нагрева. На рис. 1а приведен график работы передатчика нагрева. Различие в уровне СОР в первую и третью минуту интервала работы передатчика нагрева иллюстрирует явление гистерезиса.

Азимутально-дальностное распределение интенсивности СОР (панорама) при различной мощности нагрева приведено на рис. 2, 3. На оси ординат отложены величины углов в градусах, занимаемых СОР в азимутальной плоскости. На оси абсцисс указаны размеры области (в километрах), из которой наблюдались СОР вдоль лучей в угловом секторе приема. На рисунках нулевое значение азимутального угла φ (ось ординат) соответствует направлению на передатчик нагрева. Изолинии равной интенсивности проведены с шагом 6 дБ . Точками обозначен размер области возмущения на высоте отражения мощной радиоволны, ограниченный угловым сектором диаграммы направленности антенны передатчика нагрева по уровню -3 дБ . Стрелками указано направление горизонтальной составляющей геомагнитного поля H_0 . Из представленных данных наглядно видна формирующая роль «центра» в возбуждении ИИТ, на что указывалось в работах [3, 4].

Существенные вариации пространственных размеров импульса СОР при различной мощности радиоволны свидетельствуют об изменении пространственных размеров области возмущения. Определение характеристик области рассеяния по СОР предполагает, как известно [6, 7], правильный выбор параметров зондирующего импульса. Согласно [7], в случае, когда рассеяние радиоволн обладает ракурсными свойствами, необходимо, чтобы длительность зондирующего импульса τ удовлетворяла условию

$$\tau < R \cos \Phi_s / f L, \quad (1)$$

где f — рабочая частота, L — продольный масштаб неоднородностей, $\cos \Phi_s \approx h/R$, h — высота отражения мощной радиоволны, R — расстояние до области возмущения. При $R = 1300 \text{ км}$, $L = 10^2 \text{ м}$, $f = 20 \text{ МГц}$ и $z_0 = 340 \text{ км}$ величина τ должна быть не более $0,1\text{--}0,2 \text{ мс}$. Поэтому в данной работе для оценки размера области возмущения использовались непосредственно панорамы СОР. Предполагалось, что угловые размеры импульса СОР ($\Delta\varphi$) в азимутальной плоскости соответствуют угловым размерам области возмущения. Величина $\Delta\varphi$ определялась как угловой сектор в азимутальной плоскости, в котором уровень СОР относительно его максимального значения превышал уровень боковых лепестков приемной антенны измери-

тельческого комплекса в азимутальной плоскости. В нашем случае уровень боковых лепестков диаграммы направленности составлял примерно — 12 дБ. Полученные таким образом размеры области возмущения (L) при различной мощности накачки приведены на рис. 4а. Сплошной линией на рисунке показано изменение масштаба области возмущения при увеличении мощности накачки от 10 до 150 кВт, а пунктирной — при ее уменьшении соответственно со 150 до 10 кВт. Здесь же на рис. 4б

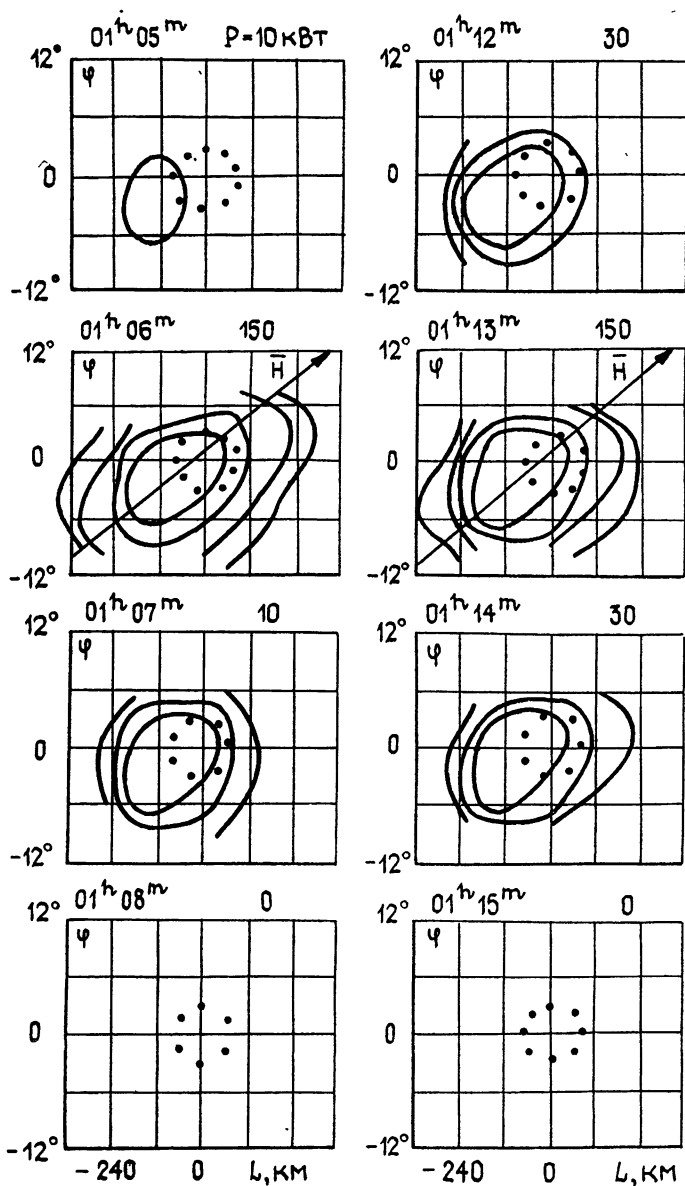


Рис. 2.

приведена аналогичная зависимость для интенсивности СОР ($A_{отн}(P_H)$). С целью уменьшения влияния естественных флуктуаций уровня сигнала от одного цикла нагрева к другому на поведение функции $A_{отн}(P_H)$ внутри каждого цикла нагрева была проведена нормировка к уровню сигнала (I_m), регистрируемого при максимальной мощности накачки.

Из рис. 4 следует, что при минимальной мощности накачки ($P_H=10$ кВт) масштаб области возмущения равен 80—150 км. Аналогичные оценки были ранее получены в работе [2]. Однако с увеличением P_H размеры области НИТ возрастают и достигают 240—400 км ($P_H=90 \div 150$ кВт). Как указывалось ранее в работе [1], масштаб возмущения при повышении P_H возрастает за счет того, что для большего сектора диаграммы направленности антенны передатчика нагрева мощность радиоизлу-

чения превосходит пороговую. В нашем случае при максимальной мощности нагрева ($P_n = 90 - 150 \text{ кВт}$) масштаб возмущения равен $L = 240 - 400 \text{ км}$. Угловой сектор антенны передатчика нагрева, участвующий в возбуждении ИИТ, равен в этом случае $30-40^\circ$. Уровень излучаемой мощности на краях такого углового сектора с учетом дополнительных потерь за счет диаграммы направленности составляет примерно $8-12 \text{ кВт}$. Соответствие этих оценок факту наблюдения СОР при $P_n = 10 \text{ кВт}$ позволяет сделать вывод, что в условиях данного эксперимента минимальный порог возбуждения ИИТ не превосходит 10 кВт . Следует отметить, что характерным для геофизических условий проведенного эксперимента являлось следующее: высота отражения радиоволны накачки равнялась $320-340 \text{ км}$ и была близка к высоте максимума F2-слоя ($360-380$) км. Критическая частота слоя F2 составляла $5,4-5,6 \text{ МГц}$.

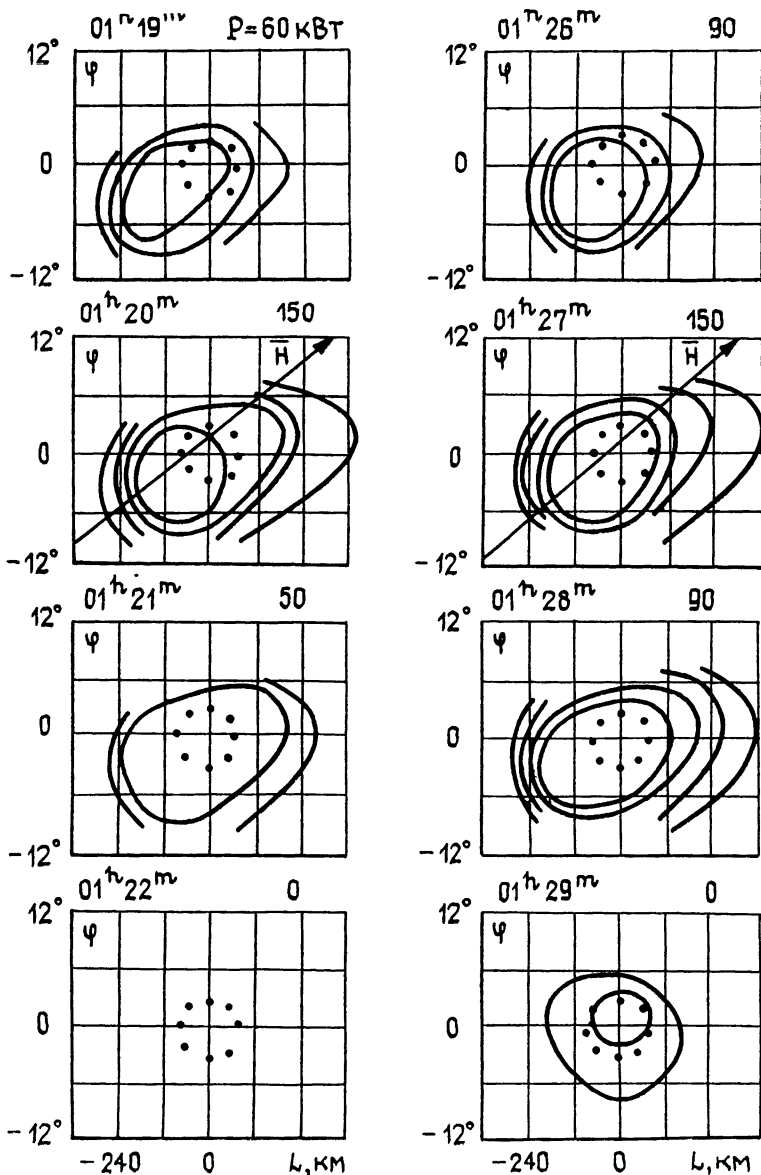


Рис 3.

В настоящее время известно, что плазменные волны, эффективно нагревающие ионосферную плазму, играют основную роль в возбуждении ИИТ [3, 4]. При этом на начальной стадии развития ИИТ преобладающим является механизм тепловой параметрической неустойчивости (ТПН) [4]. Пороговая мощность возбуждения ТПН определяется выражением

$$P_{\text{ТПН}} = c (h^2/G) (\omega_H/\omega_0)^{1/2} N T \delta^{1/2} l_3 S^{-1}, \quad (2)$$

где c —скорость света, G —коэффициент усиления антенны передатчика нагрева, ω_H —гирочастота электрона, ω_0 —рабочая частота передатчика нагрева, N и T —концентрация и температура электронов невозмущенной ионосферы, δ —доля энергии, теряемая электроном при соударении с частицами плазмы, l_3 —длина свободного пробега электрона, $S=N(\Delta h/\Delta N)$ —эффективный масштаб однородного слоя В соответствии с (2) для условий проведения данного эксперимента $P_{\text{ТПН}} \approx 15 \text{ кВт}^*$. Таким образом, величина $P_{\text{ТПН}}$ качественно согласуется с наблюдавшимся в эксперименте минимальным порогом возбуждения $P_{\text{н}} \leq 10 \text{ кВт}$.

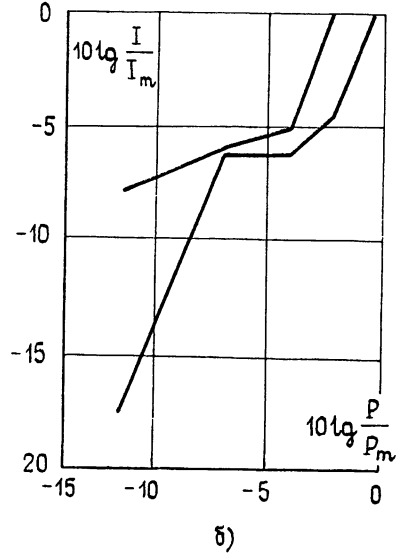
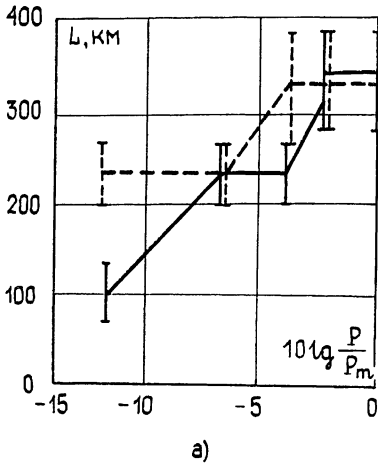


Рис. 4.

Возбуждение ИИТ при столь низких мощностях накачки в данном эксперименте, по-видимому, и определило характер поведения $A_{\text{отн}}(P_{\text{н}})$ и $L(P_{\text{н}})$, который отличается от аналогичных зависимостей, приведенных ранее в работах [1, 2].

Обусловлено это, вероятно, тем, что при воздействии мощного радиоизлучения на ионосферную плазму возможно возбуждение одновременно нескольких видов неустойчивых колебаний. Их нелинейное взаимодействие, в свою очередь, может приводить к усилению либо подавлению определенных типов возмущений и тем самым повлиять на поведение $L(P_{\text{н}})$ и $A_{\text{отн}}(P_{\text{н}})$.

Авторы благодарны Н. Г. Денисову, Л. М. Ерухимову и А. П. Сливинскому за полезное обсуждение результатов данной работы

ЛИТЕРАТУРА

1. Ерухимов Л. М., Метелев С. А., Митяков Н. А., Фролов В. А. — Изв. вузов — Радиофизика, 1978, 21, № 12, с. 1739
2. Rao P. V., Thome G. D.—Radio Sci., 1974, 9, № 11, p. 987.
3. Васильев В. В., Гуревич А. В. — ЖЭТФ, 1975, 69, № 1(7), с. 176.
4. Грач С. М., Караштин А. Н., Митяков Н. А., Рапопорт В. О., Трахтенгерц В. Ю. — Физика плазмы, 1978, 4, № 6, с. 1321.
5. Васильев В. В., Гуревич А. В. — В сб. Тепловые нелинейные явления в плазме. — Горький: ИПФ АН СССР, 1979, с. 81.
6. Татарский В. И. Распространение радиоволн в турбулентной атмосфере — М: Наука, 1967.
7. Minkoff J.—Radio Sci., 1974, 9, № 11, p. 997.
8. Гуревич А. В., Шварцбург А. Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. — М: Наука, 1973

Поступила в редакцию
2 февраля 1983 г.

* При расчетах значения T_0 , δ и l_3 задавались на основе данных, приведенных в [7], а величины h и $\Delta h/\Delta N$ определялись непосредственно из данных вертикального зондирования.