

Министерство высшего и среднего специального образования
РСФСР

Горьковский ордена Трудового Красного Знамени
научно-исследовательский радиофизический институт (НИРФИ)

П р е п р и н т № 173

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
ИСКУССТВЕННОЙ ИОНОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ
МЕТОДОМ НАКЛОННОГО РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

В.А.Алебастров

Е.А.Бенедиктов

В.Н.Иванов

Ю.А.Игнатьев

С.М.Савельев

А.П.Сливинский

А.С.Терехов

П.Б.Шавин

Горький 1983

УДК 551.510.535

Приводятся результаты исследования пространственных размеров искусственной области возмущения, ее динамики во времени и явления гистерезиса по сигналам обратного рассеяния. Показано, что в условиях летней ночи ионосферная неустойчивость возбуждается при мощности передатчика нагрева порядка 10 кВт. Получены оценки пространственных размеров области возмущения при различных мощностях передатчика нагрева. Установлено, что в зависимости от условий проведения эксперимента, масштабы области возмущения изменяются от 100 + 120 км до 240 + 340 км. Показано, что при определенных условиях пространственные размеры области возмущения формируются в течение 10 + 20 с, амплитуда рассеянного сигнала достигает квазистационарного уровня спустя 2-4 мин после начала нагрева.

1. Введение

Эффект мелкомасштабного расслоения ионосферной плазмы в поле мощной радиоволны был зарегистрирован в первых экспериментах по исследованию нелинейных явлений в ионосфере [1-5]. Использование в последующих экспериментальных работах различных радиофизических методов диагностики ионосферы (метод пробных волн [6, 7], метод радиозондирования [2, 8, 9] и ряд других методов [10-12]) позволило получить новые данные о параметрах искусственной ионосферной турбулентности (ИИТ). Результаты этих исследований значительно расширили качественное понимание процессов, протекающих в ионосфере при воздействии на неё мощным радиоизлучением [13, 14]. Вместе с тем, эти исследования выявили и ряд особенностей в поведении ИИТ, которые вызывают в настоящее время определенные трудности в их теоретической интерпретации [15]. В частности, это касается вопросов, связанных с динамикой развития и релаксации области искусственного возмущения, пространственной локализации ИИТ на различных стадиях её развития.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования параметров ИИТ при вертикальном нагреве ионосферы. Особенностью проведённых экспериментов являлось использование для диагностики параметров

ИИТ метода панорамного приема сигналов обратного рассеяния (СОР) при наклонном радиозондировании ионосферы в диапазоне декаметровых радиоволн.

В разд. 2 приводится краткое описание измерительного комплекса и методики проведения эксперимента. Результатам экспериментов посвящены разд. 3-6. В разд. 3 приведены результаты исследования амплитудно-частотных характеристик СОР от ИИТ.

Результаты эксперимента по исследованию явления гистерезиса приведены в разд. 4.

Особенности динамики пространственных масштабов области возмущения на различных стадиях развития и релаксации ИИТ рассмотрены в разд. 5.

Вариации во времени эффективной поверхности рассеяния представлены в разд. 6.

2. Описание эксперимента

Эксперименты были проведены в августе - сентябре 1980 года в ночное время (20.00 - 4.00 МДВ).

Нагрев ионосферы осуществлялся с помощью мощного передатчика (мощность 150 кВт), излучавшего на частотах 4,6 и 5,75 МГц. Антенна передатчика имела КНД порядка 100. Режим работы передатчика нагрева состоял из типовых циклов: 5 минут - нагрев, 5 минут - пауза⁺. В районе расположения передатчика нагрева осуществлялось измерение параметров ионосферы с помощью станции вертикального зондирования ионосферы.

Диагностика ИИТ осуществлялась с помощью измерительного комплекса, расположенного на удалении 1300 км от нагревного стенда. Передатчик комплекса мощностью порядка 100 кВт излучал импульсные радиосигналы длительностью 0,8 мс в КВ диапазоне. Антенна передатчика была ориентирована на область ИИТ и имела ширину в азимутальной плос-

⁺) В отдельных экспериментах длительности циклов нагрева и паузы составляли 10 минут.

кости по уровню 3 дБ порядка 40-50°.

Приемное устройство комплекса позволяло параллельно проводить прием и регистрацию СОР с десяти антенн различной ориентации в азимутальной плоскости относительно области возмущения (ОВ). Суммарный сектор обзора в азимутальной плоскости составлял 60°.

Обработка информации и управление режимами работы комплекса осуществлялась с помощью ЦВМ. Это позволяло в ходе эксперимента варьировать временем накопления информации, количеством приемных азимутальных каналов. Кроме этого, на приемном устройстве комплекса осуществлялся контроль за работой передатчика нагрева (временем включения и выключения).

Методика измерений в эксперименте была построена с учетом особенностей формирования СОР при рассеянии на анизотропных искусственных неоднородностях. Как известно [16], средняя интенсивность СОР ($I_S(r)$) при рассеянии на анизотропных неоднородностях с продольным и поперечным по отношению к геомагнитному полю размерами l_{\parallel} и l_{\perp} в борновском приближении определяется по формуле

$$I_S(r) = \frac{\sigma_E^2 k_0^4}{2(2\pi)^{3/2}} \frac{I_0}{r^2} \nu V \exp \left[-2k^2 (l_{\perp}^2 \cos^2 \psi + l_{\parallel}^2 \sin^2 \psi) \right], \quad (1)$$

где $I_0 = |A|^2 / r^2$, $|A|^2$ - мощность пробной волны, σ_E^2 - дисперсия флуктуаций диэлектрической проницаемости, r - рассеяние от источника пробного поля до ИИТ, $\nu = \pi l_{\perp}^2 l_{\parallel}$, V - эффективный объем области возмущения, участвующий в формировании СОР, ψ - угол между направлением прихода пробной радиоволны и нормалью к геомагнитному полю \vec{H} , вдоль которого ориентированы искусственные неоднородности (ракурсный угол).

При рассеянии на анизотропных неоднородностях уровень СОР, согласно формуле (1), существенно зависит от величины ракурсного угла ψ , достигая максимального значения в случае, когда ракурсный угол равен нулю и объём области возмущения, участвующий в формировании рассеян-

его сигнала V , максимален. При конкретной геометрии эксперимента (взаимного расположения источника пробных волн и области возмущения) и геофизических условий его проведения оптимальные условия наблюдения СОР будут так же зависеть от частоты пробных радиоволн. В этом случае методика проведения эксперимента, целью которого является диагностика параметров ИИТ, должна предусматривать как контроль ракурсного условия, так и определение эффективного рассеивающего объема V . Этого можно добиться проведением измерений на скользкой частоте в широком частотном диапазоне и корректном выборе длительности зондирующего импульса [17].

Учитывая это, измерения проводились следующим образом. В первом цикле нагрева, спустя 1–2 минуты после его начала, проводились измерения уровня СОР в широком диапазоне частот. По результатам этих измерений определялась частота, на которой уровень СОР был максимален. В следующем цикле нагрева измерения проводились уже на этой частоте. Существенным моментом в экспериментах являлось использование панорамной регистрации СОР. Это позволило упростить задачу выделения СОР от ИИТ и кроме этого получить информацию о пространственных масштабах и локализации области возмущения.

3. Частотные характеристики СОР.

Методической особенностью экспериментов, как уже отмечалось, являлось измерение СОР на скользкой частоте и в широком диапазоне частот.

На рис. 1 приведены панорамы СОР, полученные на различных частотах в одном из циклов нагрева. Измерения выполнены в полночь, спустя 2 минуты после начала цикла нагрева. На рисунке панорамы СОР изображены в виде амплитудно-дальностного распределения уровней СОР в координатах азимут-дальность. Нулевое значение азимутального угла φ (ось ординат) соответствует направлению на передатчик нагрева. Пунктиром обозначен размер области на высоте отражения мощной радиоволны, ограниченный угловым

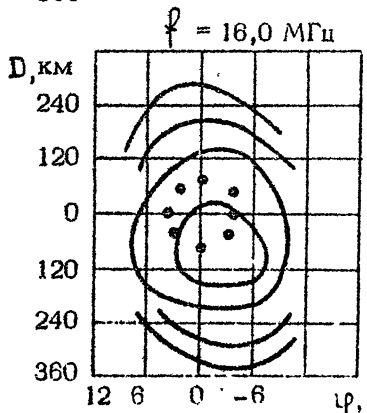
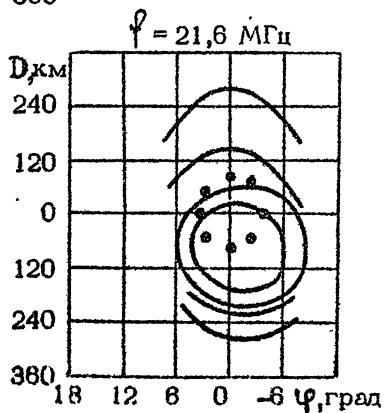
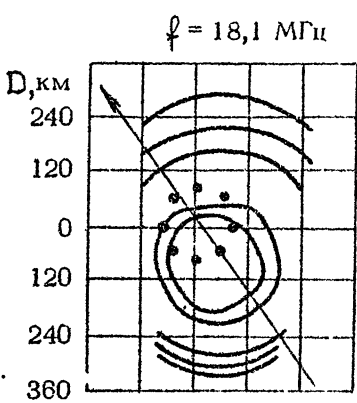
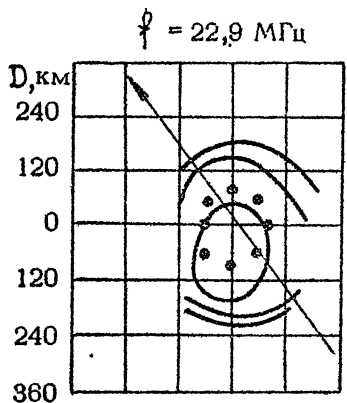
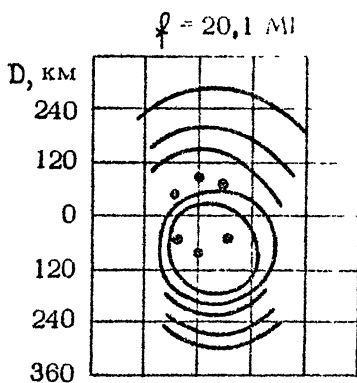
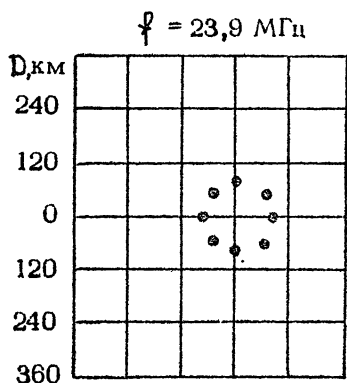


Рис. 1

град

сектором диаграммы направленности антенны передатчика нагрева по уровню -3дБ . Изолинии равной интенсивности проведены с шагом 6 дБ относительно максимального уровня СОР . Здесь же указано и направление геомагнитного поля H . Данные на рис. 1 наглядно иллюстрируют ракурсные свойства рассеяния на ИИТ, что обуславливает изменение пространственных размеров СОР в диапазоне частот наблюдения. Следует так же указать и на то, что область максимальных уровней СОР смещена к югу от центра диаграммы направленности нагревного стенда.

На рис. 2а приведена частотная зависимость эффективной поверхности рассеяния σ ИИТ. Величина σ рассчитывалась по формуле

$$\sigma = \frac{I_s \pi^2 r^4}{P G S} \quad (2)$$

где I_s - максимальный уровень СОР , P - мощность передатчика пробных волн, G - коэффициент усиления передающей антенны, S - эффективная площадь приемной антенны, r - расстояние от измерительного комплекса до ИИТ.

Приведенная частотная зависимость σ , рис. 2а, является типичной. Она наблюдалась в циклах нагрева, проведенных в различное время ($20.00 + 4.00\text{ МДВ}$) и не зависела от частоты нагревного передатчика. Предельная частота наблюдения СОР при этом отслеживала регулярные вариации максимально-приемной частоты слоя F_2 в районе нагрева, но превышала ее на $2+3\text{ МГц}$. Так как при обратном рассеянии наибольший вклад в интенсивность сигнала дают неоднородности с $l_{\perp} \sim \lambda/2$, то для нашего случая размер неоднородностей l_{\perp} составит $\sim 7-10\text{ м}$. Для неоднородностей с таким поперечным масштабом спектр флуктуаций интенсивности изменяется незначительно [2] и, по видимому, можно утверждать, что зависимость $\sigma(f)$ определяется вариациями ракурсного угла. Это подтверждают и результаты численных расчетов величины ракурсного угла ψ , выполненные для условий проведения данных измерений с учетом реальных параметров ионосферы. Расчеты выполнены в геометрооптическом приближении. Сопоставляя

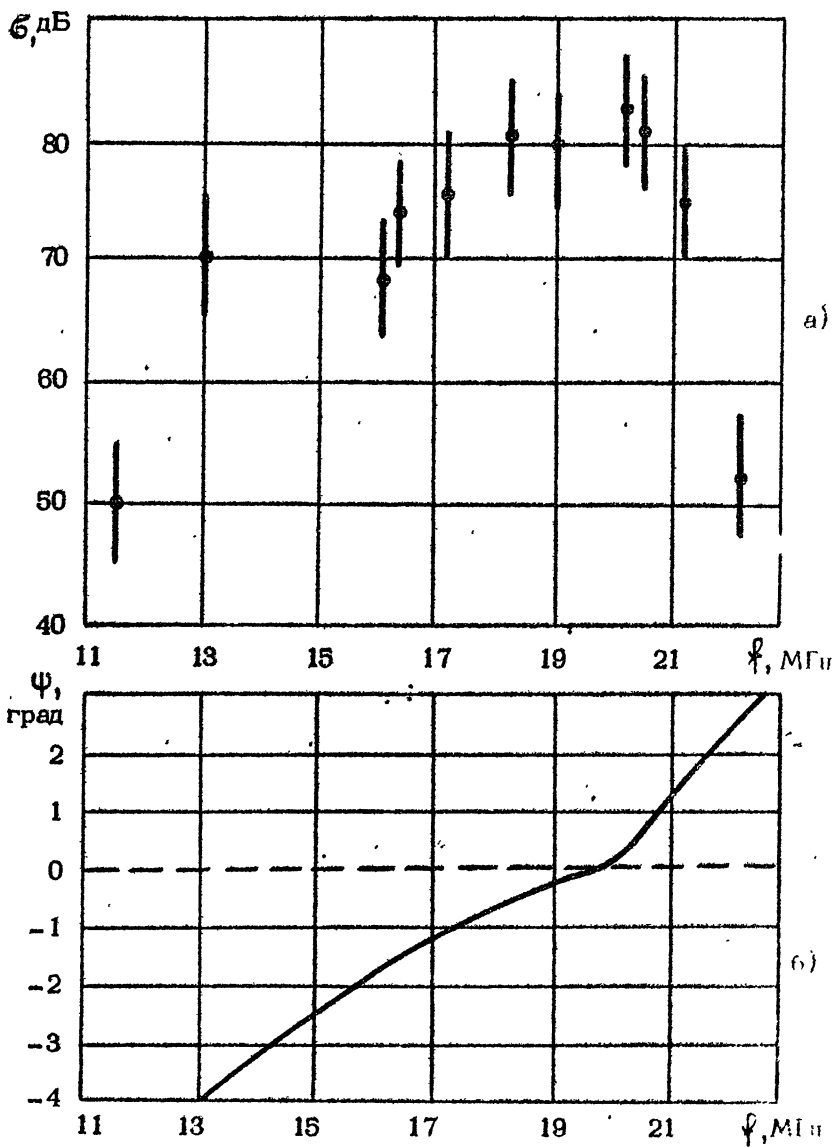


Рис. 2

экспериментально измеренную зависимость $\sigma(\varphi)$ (рис. 2а) и результаты расчетов $\psi(\varphi)$ (рис. 2б), видно, что $\sigma(\varphi)$ достигает максимальных значений на частотах, где угол ψ близок к нулю ($+1^\circ$). Несложно показать, что наблюдавшийся в экспериментах вид частотной зависимости σ соответствует рассеянию на анизотропных неоднородностях с $l_{\perp}/l_{\parallel} \sim 10^2$ и, следовательно, величина l_{\parallel} составляет $\sim 10^3$ м. Полученные оценки согласуются с данными, приведенными в работе [18].

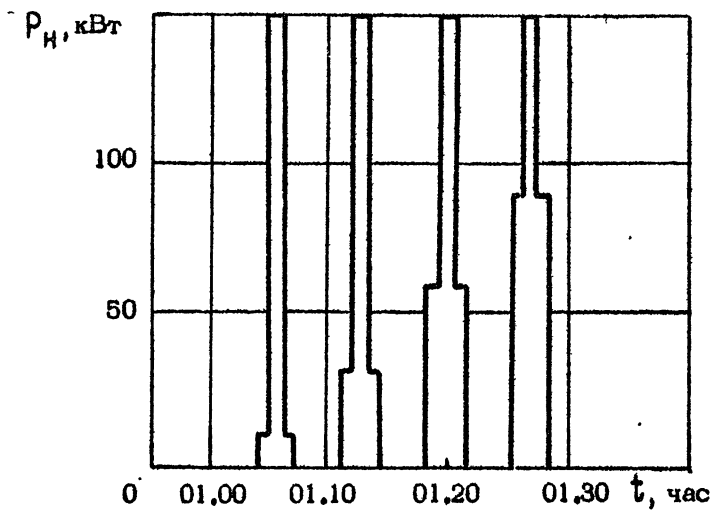
4. Результаты эксперимента по исследованию явления гистерезиса при искусственном возмущении ионосферной плазмы

В одном из дней проведения экспериментов режим работы передатчика нагрева состоял из циклов: 3 минуты – нагрев, 4 минуты – пауза. В период работы передатчика нагрева его мощность изменялась в соответствии с графиком, приведенным на рис. 3а. Диагностика ИИТ проводилась на фиксированной частоте, равной 20 МГц. Данная частота была выбрана на основе результатов измерений частотной зависимости интенсивности СОР, которые были проведены перед началом эксперимента по исследованию явления гистерезиса. Таким образом, в эксперименте исследовались особенности возбуждения искусственных неоднородностей с поперечным масштабом $l_{\perp} \lesssim 7,5$ м.

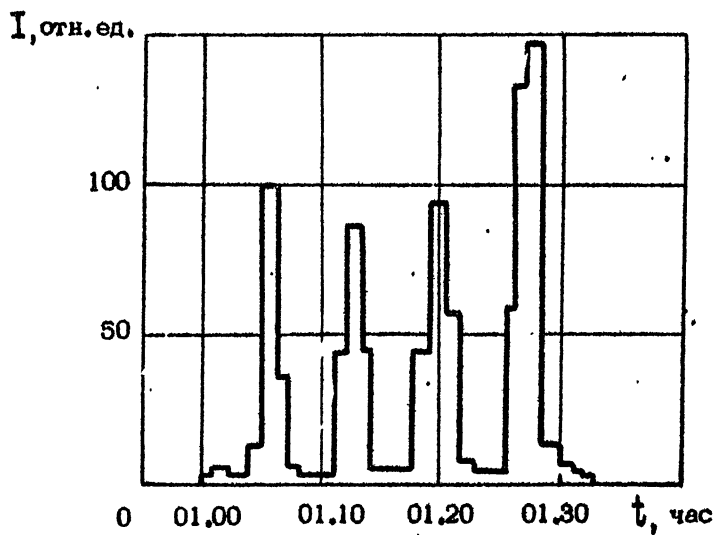
Регистрация СОР проводилась спустя 10–20 секунд после очередного переключения мощности передатчика нагрева. В период паузы такт измерения составлял одну минуту.

На рис. 3б приведены вариации во времени уровня СОР (I_S), наблюдавшиеся при приеме на антенну, ориентированную в азимутальной плоскости непосредственно на передатчик нагрева. Различие в уровне СОР в первую и третью минуты интервала работы передатчика нагрева (график работы которого представлен на рис. 3а) иллюстрируют явление гистерезиса.

Азимутально-дальностное распределение интенсивности



а)



б)

Рис. 3

д. СОР (панорама) при различной мощности нагрева приведено на рис. 4,5. В панорамах изолинии уровней СОР проведены с шагом 6 дБ относительно максимального уровня сигнала. На рисунках нулевое значение азимутального угла φ (ось ординат) соответствует направлению на передатчик нагрева. Точками обозначен размер области на высоте отражения мощной радиоволны, ограниченный угловым сектором диаграммы направленности антенны передатчика нагрева по уровню -3дБ. Направление геомагнитного поля \vec{H} на рисунке отмечено стрелкой. Из представленных данных наглядно видна формирующая роль "центра" в возбуждении ИИТ, на что указывалось ранее в работах [19, 20].

Существенное изменение пространственных размеров СОР с изменением мощности накачки свидетельствует, очевидно, об изменении пространственных размеров области возмущения. В данном эксперименте для оценки размера области возмущения L использовались непосредственно панорамы СОР. Величина L определялась через угловой сектор в азимутальной плоскости, в котором уровень СОР относительно его максимального значения превышал уровень боковых лепестков приемной антенны измерительного комплекса в азимутальной плоскости. В нашем случае уровень боковых лепестков диаграммы направленности составлял примерно -12дБ. Полученные таким образом размеры области возмущения (L) при различной мощности накачки приведены на рис. 6а. Здесь же, на рис. 6б, показана аналогичная зависимость для интенсивности СОР ($I_S(P_H)$). С целью уменьшения влияния естественных флуктуаций уровня сигнала от одного цикла нагрева к другому на поведение функций $I_S(P_H)$ внутри каждого цикла нагрева была проведена нормировка к уровню сигнала (I_m), регистрируемого при максимальной мощности накачки. Из рис. 6а следует, что при минимальной мощности накачки ($P_H = 10$ кВт) масштаб области возмущения равен 80 - 150 км. Аналогичные оценки были ранее получены в работе [21]. Однако с увеличением P_H размеры области ИИТ возрастают и достигают 200 - 340 км ($P_H = 90 - 150$ кВт). Как указывалось ранее в работе [22], P_H масштаб возмущения при повышении P_H возрастает за счет того, что для большего сектора диаграммы направленности антенны передатчика нагрева мощ -

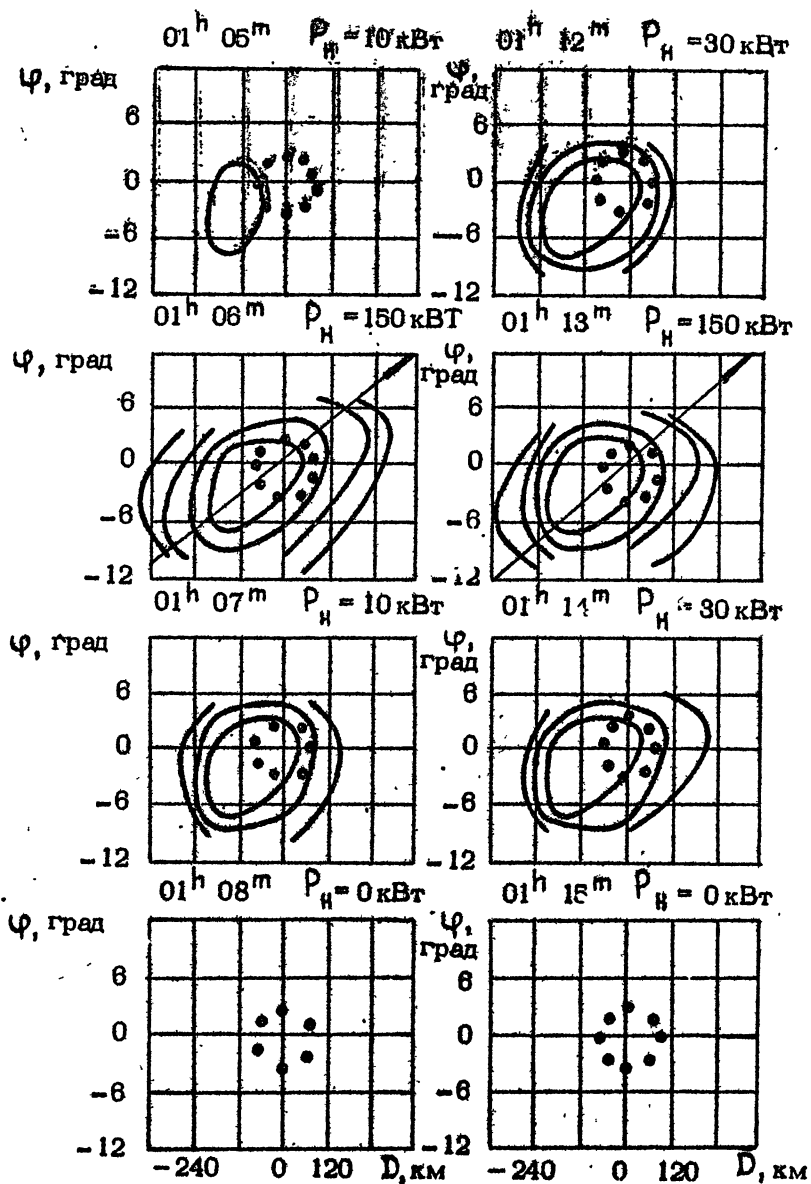


Рис. 4

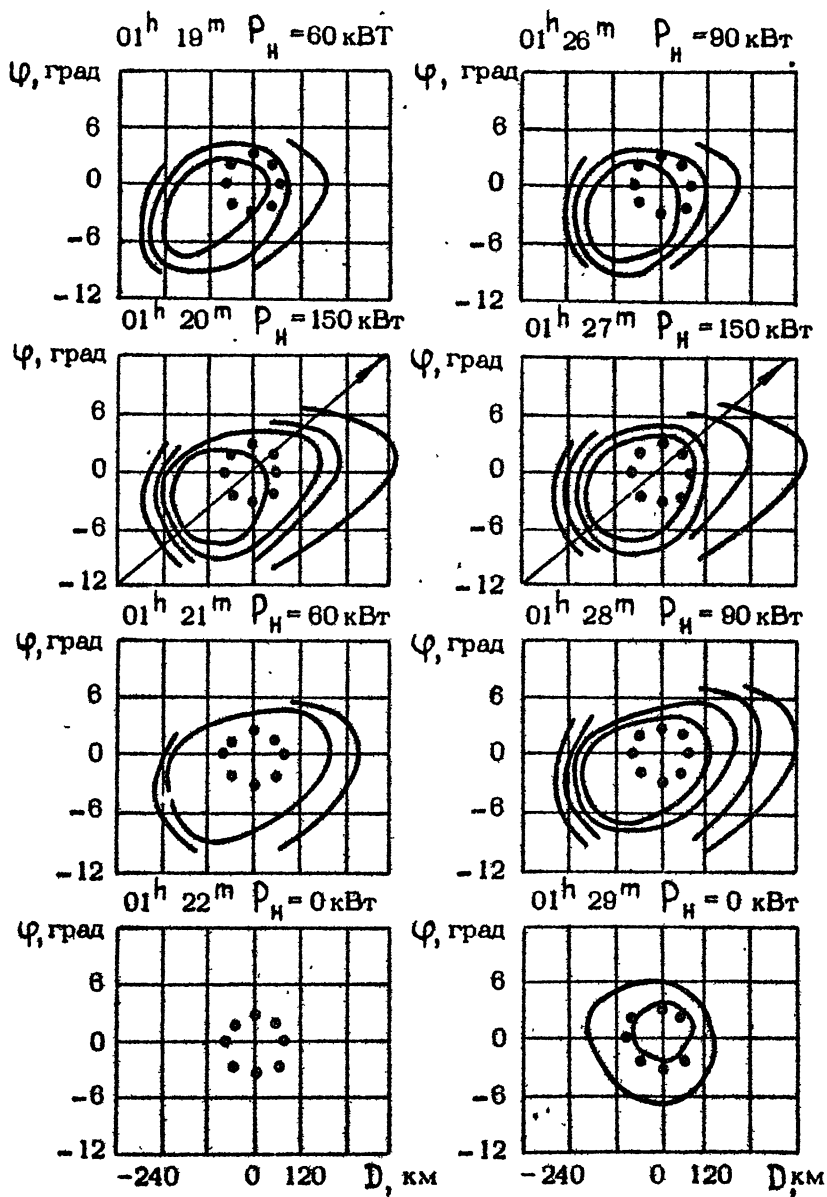


Рис. 5

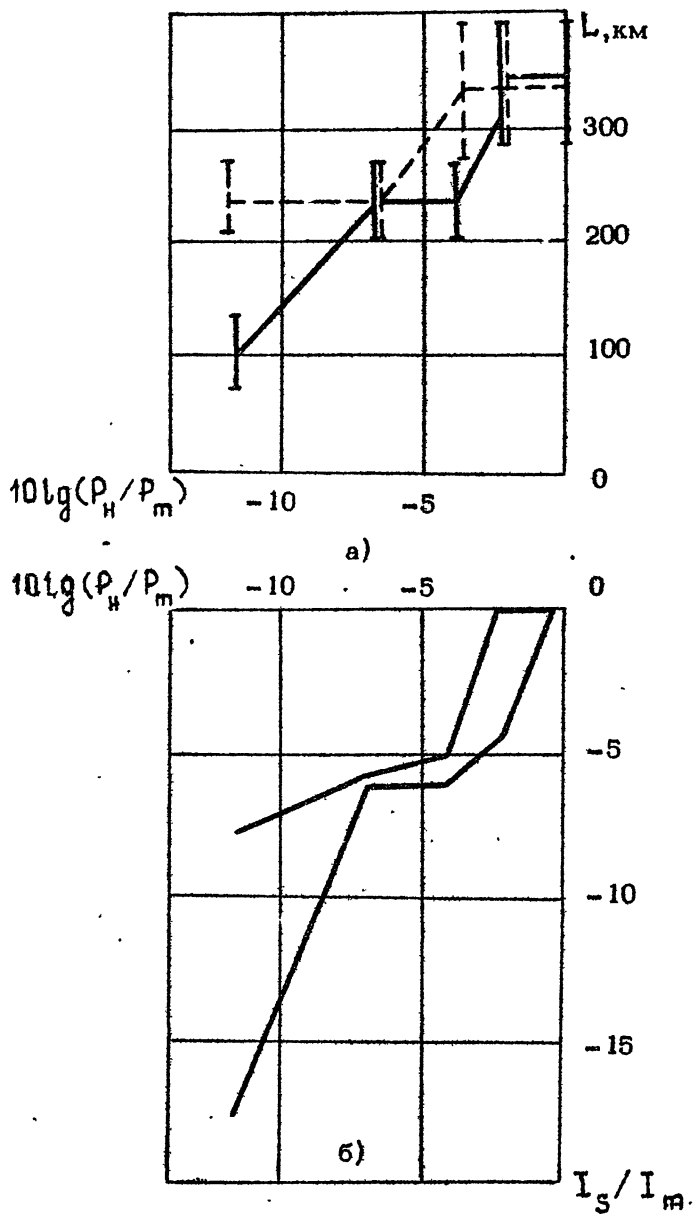


Рис. 6

ность радиоизлучения превосходит пороговую. В нашем случае при максимальной мощности нагрева ($P_m \approx 150$ кВт) масштаб возмущения равен $L_m = 240 - 340$ км. Следует отметить, что характерным для геофизических условий проведенного эксперимента являлось следующее: высота отражения волны накачки равнялась $320 - 340$ км и была близка к высоте максимума F_2 -слоя ($360 - 380$ км). Критическая частота слоя F_2 составляла $5,4 - 5,6$ МГц.

В настоящее время известно, что плазменные волны, эффективно нагревающие ионосферную плазму, играют основную роль в возбуждении ИИТ [19]. При этом на начальной стадии развития ИИТ преобладающим является механизм тепловой параметрической неустойчивости ТПН [19].

Согласно [13], пороговая мощность возбуждения ТПН определяется выражением

$$P_{ТПН} = 6 \frac{h^2}{G} \left(\frac{\omega_H}{\omega} \right)^{1/2} N T \delta^{1/2} l_e S^{-1} c, \quad (3)$$

где c - скорость света, h - высота отражения волны накачки, G - коэффициент усиления антенны передатчика нагрева, ω_H - гирочастота электрона, ω - рабочая частота передатчика нагрева, N и T - концентрация и температура электронов невозмущенной ионосферы, δ - доля энергии, теряемая электроном при соударении с частицами плазмы, l_e - длина свободного пробега электрона, $S = \Delta h / \Delta N$ - эффективный масштаб однородного слоя. Для условий проведения данного эксперимента, в соответствии с (3), $P_{ТПН} \approx 15$ кВт. Таким образом, величина $P_{ТПН}$ качественно согласуется с наблюдавшимся в эксперименте минимальным порогом возбуждения ИИТ $P_{п1} \sim 10$ кВт.

Возбуждение ИИТ при столь низких мощностях накачки, наблюдавшееся в данном эксперименте, по-видимому и опре-

^{*)} При расчетах значения T , δ и l_e задавались на основе данных, приведенных в [23], а величины h и $\frac{\Delta h}{\Delta N}$ определялись непосредственно из данных вертикального зондирования.

делию характер поведения $I_S(P_H)$, который при малых мощностях отличается от аналогичных зависимостей, приведенных в работе [21, 22]. Не исключено, что при воздействии мощного радиоизлучения на ионосферную плазму возможно возбуждение одновременно нескольких видов неустойчивостей [14, 23]. Их нелинейное взаимодействие, в свою очередь, может приводить к усилению либо подавлению определенных типов возмущений и тем самым влиять на поведение $L(P_H)$ и $I_S(P_H)$.

5. Динамика области возмущения

В данном разделе на основе экспериментальных результатов по наблюдению сигналов обратного рассеяния рассмотрены особенности динамики области искусственного возмущения. Методика проведения экспериментов и используемые средства диагностики приведены в разд. 2.

На рис. 7, 8 приведены типичные панорамы СОР, наблюдавшиеся спустя 2-3 минуты после начала цикла нагрева на $f_H = 5,75$ и 4,6 МГц соответственно. Как следует из рисунков, пространственные размеры импульса СОР существенно изменялись со временем и максимальные масштабы СОР наблюдались в полночь.

На рис. 9 (а, б) приведена динамика во времени горизонтального размера области возмущения L при рабочих частотах передатчика нагрева 5,75 и 4,6 МГц соответственно. Как видно из рисунка, в моменты времени, соответствующие началу регистрации СОР от ИИТ (~ 20.00 для $f = 5,75$ МГц и ~ 22.00 для $f = 4,6$ МГц), размеры области возмущения равны $\sim 80-140$ км. Максимальные размеры области возмущения наблюдались в полночь и составляли $L \sim 240-340$ км. Наиболее вероятной причиной таких вариаций пространственных размеров области возмущения может быть изменение условий возбуждения ИИТ.

Экспериментальные данные, иллюстрирующие закономерности динамики ОВ при включении (00.16 час) и выключении (00.26 час) передатчика нагрева, приведены на рис. 10, 11. Измерения выполнены на частоте 20 МГц. Время

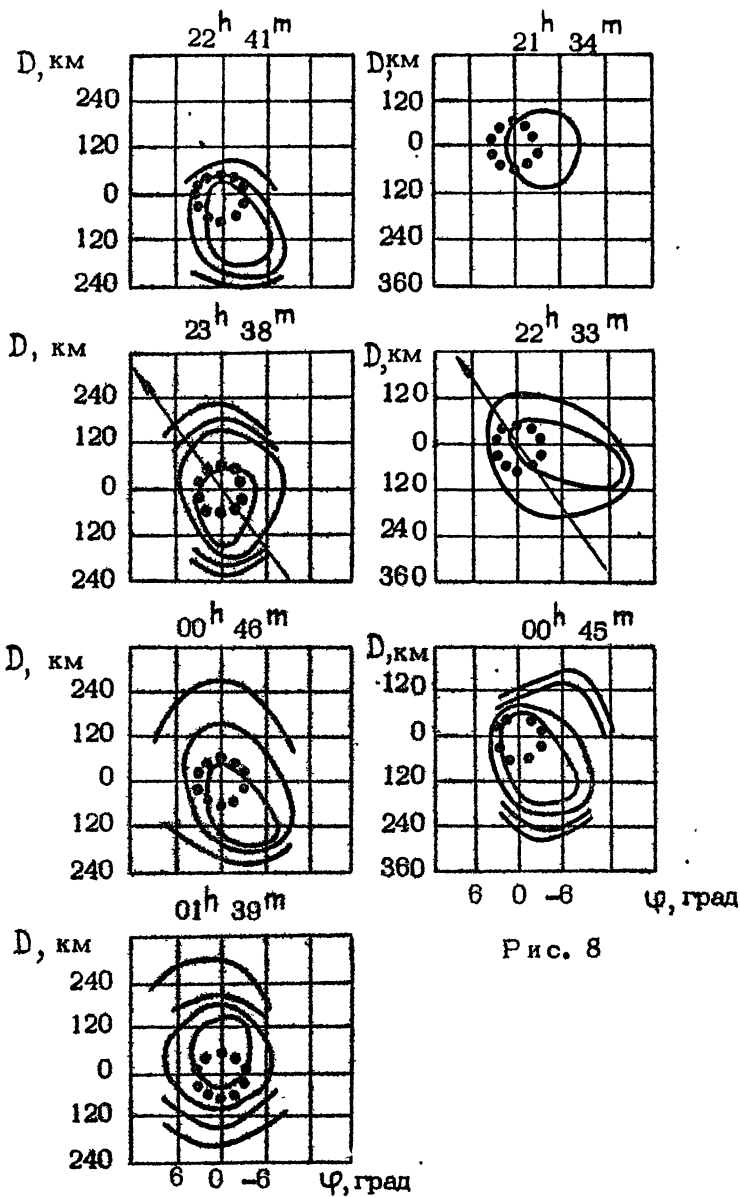
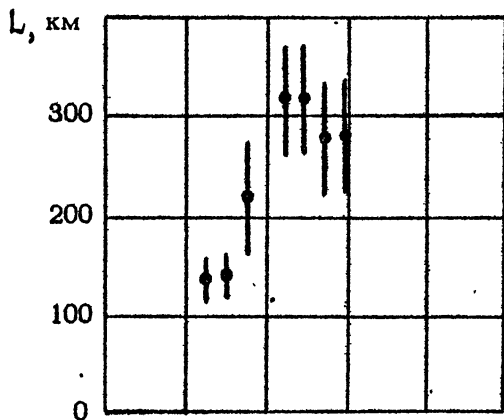
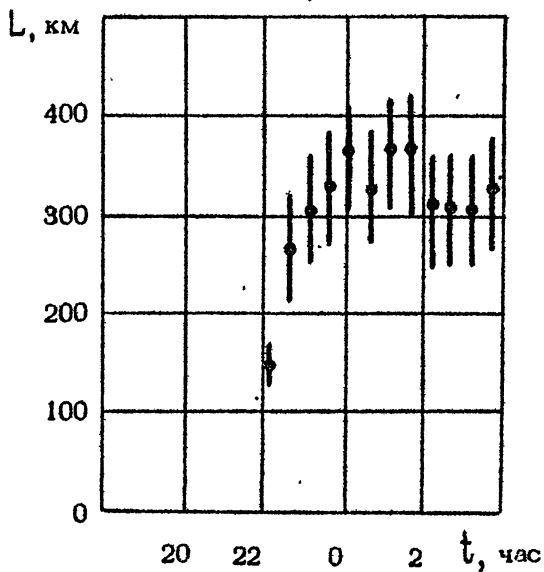


Рис. 8

Рис. 7

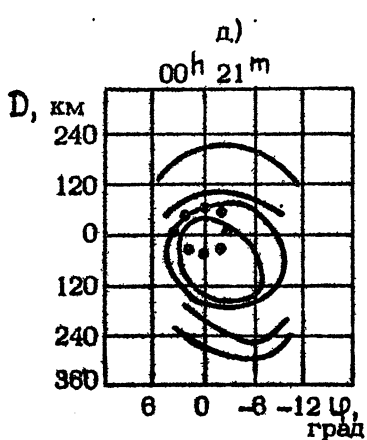
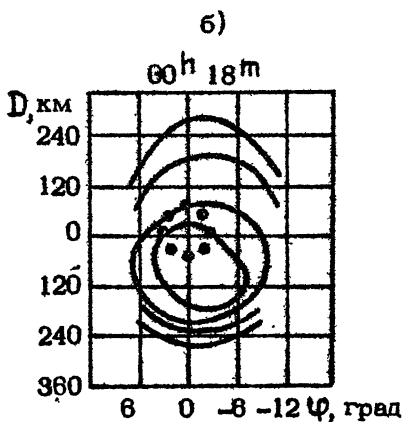
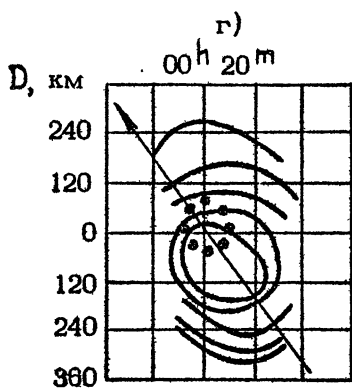
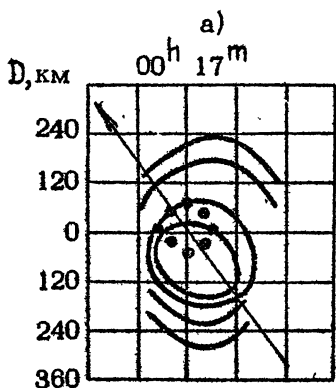
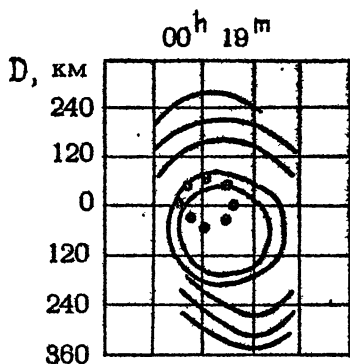
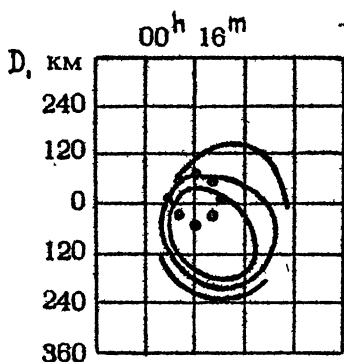


a)



б)

Рис. 9



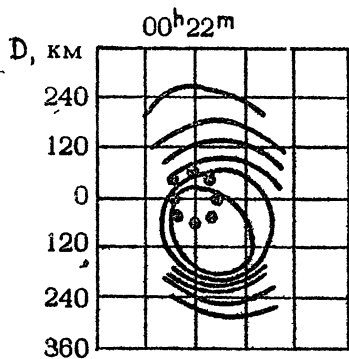
6 0 -8 -12 φ , град

6 0 -8 -12 φ , град

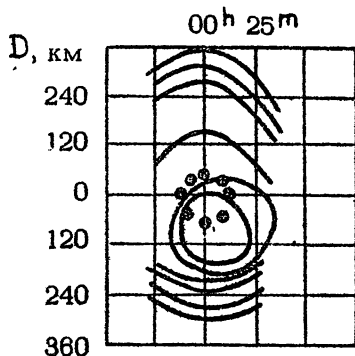
в)

е)

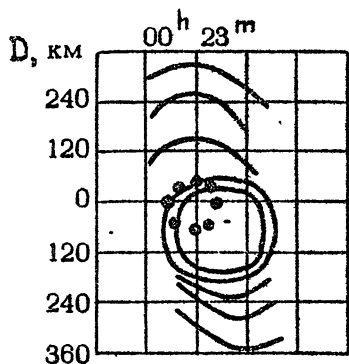
Рис. 10



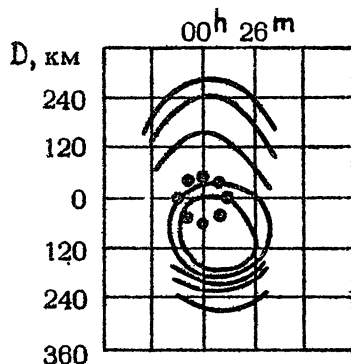
а)



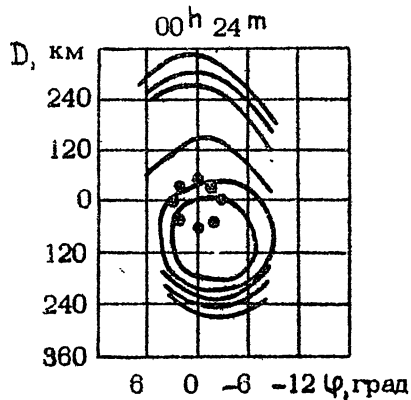
г)



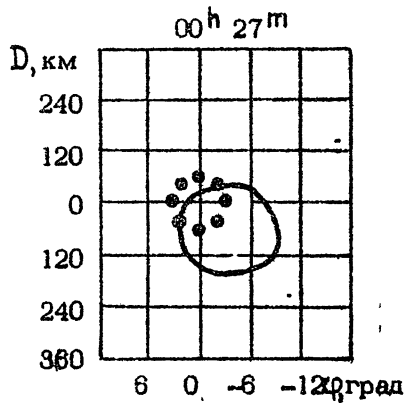
б)



д)



в)



е)

Рис. 11

некогерентного усреднения было выбрано 20 секунд. Как и ранее, пунктиром указаны горизонтальные размеры области ионосферы, освещаемые антенной передатчика на высоте отражения радиоволны нагрева. Как видно из рисунков, распределение интенсивности СОР ориентировано вдоль направления геомагнитного поля (на рисунке направление \vec{H} указано стрелкой).

Более детальное исследование особенностей развития и релаксации ИИТ проводилось на основе анализа формы импульса СОР при приеме рассеянного сигнала на антенну, ориентированную в азимутальном направлении на область возмущения.

Анализ экспериментальных данных показал, что характерные времена развития и релаксации ИИТ существенно зависят от времени наблюдения. Так, в период 21.00–22.00 МДВ, соответствующий началу регистрации СОР, при нагреве на $f_H = 5,75$ МГц рассеянный сигнал появлялся спустя 1–5 с после включения передатчика нагрева. Таким образом, можно предполагать, что пространственные размеры области возмущения в данных условиях начинают формироваться спустя 1–5 секунд. Время развития максимальной интенсивности СОР было равно в среднем 20–30 секунд, а время релаксации 30–40 секундам.

Более сложная динамика ИИТ наблюдалась в 0.00–3.00 МДВ при нагреве на $f = 4,8$ МГц. В развитии интенсивности СОР наблюдались два характерных временных интервала: первый длительностью не более 20–30 секунд, в течение которого интенсивность СОР резко возрастает, и второй – длительностью 2–4 минуты, когда интенсивность сигнала достигла квазистационарного уровня.

Время релаксации СОР составляет в среднем 2–3 минуты. При этом интенсивность СОР в течение 30–40 секунд после выключения передатчика нагрева уменьшалась на 10–15 дБ. Далее скорость уменьшения уровня СОР падает.

Как известно [22–24], наблюдавшиеся характерные времена быстрой релаксации уровня СОР (30–40 секунд) указывают на диффузионный характер релаксации искусственных неоднородностей.

Вместе с тем, как и в ранее проведенных экспериментах, в отдельные сеансы наблюдались большие времена ре-

лаксации ИИТ, составляющие 3-5 минут. Согласно результатам наших экспериментов, наиболее часто такие времена наблюдались в 24.00-02.00 МДВ, т.е. в оптимальных условиях возбуждения ИИТ. Следует также заметить, что в этот период времени, спустя 40-60 секунд после выключения передатчика нагрева, достаточно регулярно регистрировались СОР с двумя локальными максимумами интенсивности, что связано, но-видимому, с наличием двух рассеивающих центров области возмущения.

6. Вариации во времени эффективной поверхности рассеяния ИИТ

Как известно [15], динамика регулярной ионосферы в значительной степени влияет на параметры области искусственного возмущения, ее неоднородной структуры. В частности, геофизические условия проведения эксперимента определяют порог возбуждения ИИТ, ее динамику и пространственные масштабы.

Существенные временные вариации характерны и для эффективного поперечника рассеяния ИИТ. На рис. 12а, 13а приведены временные вариации получасовых медианных значений σ при наблюдении на оптимальных частотах для рабочих частот передатчика нагрева соответственно 4,6 и 5,75 МГц. Здесь же на рисунках приведены данные, характеризующие условия проведения эксперимента. На рис. 12б, 13б приведены вариации критической частоты слоя F_2 . Пунктиром здесь отмечена частота передатчика нагрева. На рис. 12в, 13в приведен диапазон высот (ΔH), для которого выполнялись условия ракурсности при зондировании ИИТ на оптимальной частоте и временной ход высоты отражения мощной радиоволны H (пунктир) для частот 4,6 и 5,75 МГц соответственно. Величина ΔH определялась на основании расчетов, выполненных в геометрооптическом приближении с учетом регулярных пространственно-временных вариаций параметров ионосферы. Предполагалось также, что условия ракурсности выполнены, если величина ракурсного угла не

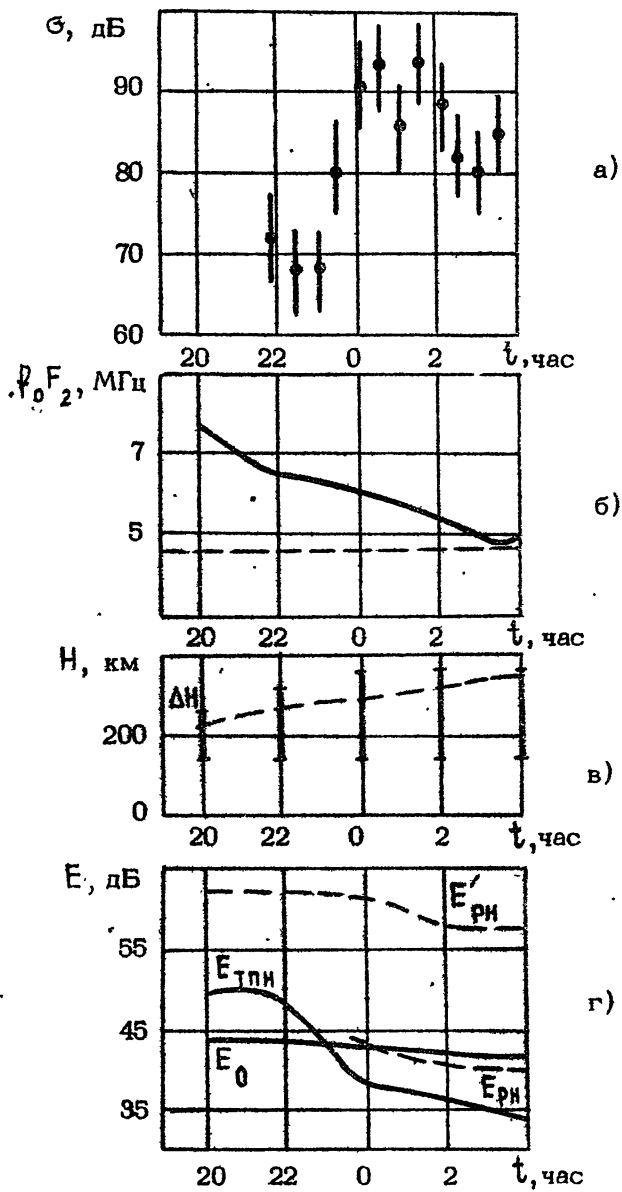


Рис. 12

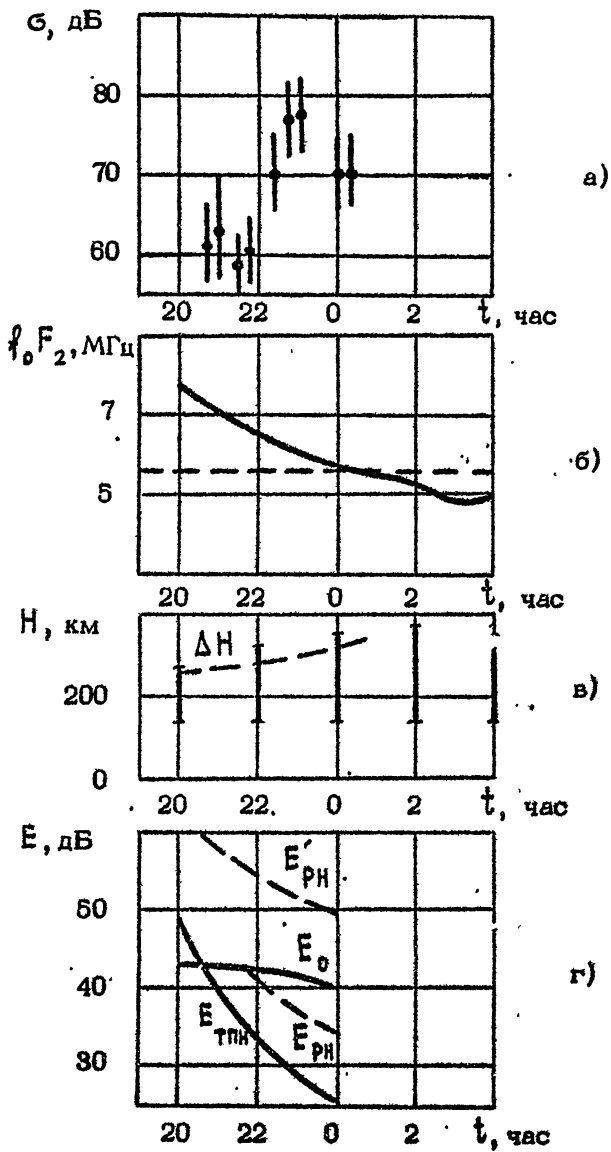


Рис. 13

превышала $+ 2^{\circ}$.

Как следует из рисунков, условия ракурсности в данном эксперименте выполнялись в течение всего сеанса наблюдений независимо от рабочей частоты передатчика нагрева. Поэтому различие во времени начала регистрации СОР, наблюдавшееся в эксперименте при нагреве ионосферы на различных частотах, связано, по-видимому, с изменением условий возбуждения ИИТ.

По мере приближения рабочей частоты передатчика нагрева к критической частоте F_2 - слоя наблюдается увеличение σ . Максимальные σ наблюдались при $f_{0F_2} - f_H \approx 1$ МГц. При $f_H > f_{0F_2}$ СОР практически не наблюдался.

С целью уточнения закономерностей временных вариаций σ был проведен дополнительный анализ условий проведения эксперимента. В частности, были выполнены расчеты порогов возбуждения ИИТ, обусловленных тепловой параметрической ($E_{ТПН}$) и резонансной неустойчивостью ($E_{РН}$).

При расчетах, как и ранее, параметры стенда нагрева были следующими: мощность передатчика 150 кВт; КНД антенны 100. Параметры ионосферы, необходимые для расчетов $E_{ТПН}$ и $E_{РН}$ задавались по данным долгосрочного прогноза и таблиц, приведенных в работе [23]. Величина начального фонового возмущения электронной концентрации неоднородностей для вычисления $E_{РН}$ была выбрана равной $\Delta N/N \sim 5 \cdot 10^{-3}$, что соответствует уровню флуктуаций концентрации искусственных неоднородностей, генерируемых ТПН. Последнее обстоятельство должно приводить к эффективному снижению порога возбуждения РН в условиях развитой ТПН по отношению к порогу РН в условиях естественного фона флуктуаций ($\Delta N/N \sim 10^{-3}$). Результаты расчетов⁺⁾ приведены на рис. 12г, 13г. Здесь показана динамика во времени порогов возбуждения для ТПН и РН, при частоте нагревной радиоволны 4,8 и 5,75 МГц соответственно. На рис. 12г, 13г приведен также ход во времени напряженности поля накачки E_0 . Пунктиром на рисунке показана пороговая мощность возбуждения РН ($E_{РН}$) при относительном уровне концентрации естественных ионосферных неоднородностей ($\Delta N/N \sim 10^{-3}$). Результаты расчетов (рис. 12г, 13г) наглядно иллюстрируют

⁺⁾ Расчеты проводились относительно уровня $F = 1 \frac{mB}{M}$.

зависимость порога возбуждения РН и ТПН от параметров регулярной ионосферы. Видно так же, что величина $E_{ТПН}$ меньше $E_{РН}$ и $E'_{РН}$ при заданных значениях концентрации фоновых неоднородностей. Очевидно, что условия возбуждения ионосферной неустойчивости при относительно постоянной величине напряженности поля накачки E_0 будут выполняться прежде всего для ТПН. Время, когда выполняются условия возбуждения РН ($E_{РН} \leq E_0$) сдвинуто относительно времени возбуждения ТПН, согласно расчетам, на один час. Сопоставляя между собой результаты экспериментов и расчета можно указать на следующее:

– начало регистрации СОР в эксперименте соответствует времени, когда начинали выполняться условия возбуждения ТПН, т.е. $E_{ТПН} \leq E_0$;

– примерно через час после начала регистрации СОР наблюдалось резкое увеличение σ , что соответствует по времени периоду, когда $E_{РН} < E_0$.

Заключение

Основные результаты, полученные при исследовании ИИТ методом радиозондирования области искусственного возмущения в диапазоне декаметровых радиоволн состоят в следующем.

1. Исследованы особенности возбуждения ИИТ. Получено, что в условиях летней ночи ионосферная неустойчивость возбуждается уже при мощности передатчика нагрева порядка 10 кВт.

2. Получены оценки пространственных размеров области возмущения в период с 20 до 04 МДВ летом 1980 года при разных мощностях передатчика нагрева. Установлено, что в зависимости от условий проведения эксперимента масштабы области возмущения изменяются от 100 – 120 до 240 – 340 км.

3. Исследованы вопросы пространственной локализации ИИТ на различных стадиях ее развития и релаксации. Экспериментально подтверждена формирующая роль "центра"

области нагрева в возбуждении и релаксации ИИТ.

4. Динамика развития и релаксации ИИТ существенно зависит от соотношения нагревной и критической частотой F_2 - слоя ионосферы. При этом, в случае когда рабочая частота передатчика нагрева близка к критической частоте слоя F_2 , а высота отражения мощной радиоволны более 300 км, пространственные размеры области возмущения формируются в течение первых 10 + 20 секунд. Амплитуда рассеянного сигнала достигает квазистационарного уровня спустя 2 - 4 минуты после начала цикла нагрева. В этот период, как правило, наблюдались большие времена релаксации ИИТ, достигающие 3 - 5 минут.

Анализ результатов эксперимента показал, что:

- возбуждение анизотропных мелкомасштабных искусственных неоднородностей ($h_p \sim 7 + 10$ м) обусловлено ТПН,

- ТПН является эффективным источником генерации искусственных неоднородностей. В условиях развитой ТПН при достаточном уровне флуктуаций концентраций неоднородностей ($\Delta N/N \sim 5 \cdot 10^{-3}$) возможно возбуждение РН.

В заключение авторы выражают благодарность Н.А. Митякову и Н.А.Зуйкову за обеспечение работы нагревного комплекса, Н.Г.Денисову и Л.М.Ерухимову за полезные обсуждения.

Литература

1. Utlaut W.F., Wiolette E.J.-Radio Sci., 1974, v.9, N11, p.895.
2. Fialer P.A.-Radio Sci., 1974, v.9, N11, p.923.
3. Bowhill S.A.-Radio Sci., 1974, v.9, N11, p.975.

4. Гетманцев Г.Г., Комраков Г.П. и др. - Письма в ЖЭТФ, 1973, т. 18, № 10, с. 621.
5. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А. и др. - УФН, 1974, т. 113, № 4, с. 732.
6. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Гетманцев Г.Г. и др. Письма в ЖЭТФ, 1976, т. 22, № 10, с. 497.
7. Allen E.M., Thome G.D., Rao P.B.-Radio Sci., 1974, v.9, N11, p.905.
8. Thome G.D., Blood D.W.-Radio Sci., 1974, v.9, N11, p.917.
9. Minkoff J., Kugelman P., Weissman I. - Radio Sci., 1974, v.9, N11, p.941.
10. Митяков Н.А., Рапопорт В.О., Трахтенгерц В.Ю. - Изв. вузов - Радиофизика, 1975, т. 18, № 9, с. 1273.
11. Ютло У., Киси Р. - УФН, 1973, т. 109, № 2, с. 371.
12. Gordon W.E., Carlson H.C.-Radio Sci., 1974, v.9, N11, p.1041.
13. Грач С.М., Митяков Н.А., Рапопорт В.О., Трахтенгерц В.Ю. - В сб.: Тепловые нелинейные явления в плазме. - ИФФ АН СССР, Горький, 1979, с. 46.
14. Васьков В.В., Гуревич А.В. - В сб.: Тепловые нелинейные явления в плазме - ИФФ АН СССР, Горький, 1979, с. 81.
15. Ерухимов Л.М., Метелев С.А., Митякова Э.Е. и др. - В сб.: Тепловые нелинейные явления в плазме ИФФ АН СССР, Горький, 1979, с. 7.
16. Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику. - М.: Наука, 1978, т. П.
17. Minkoff J.-Radio Sci., 1974, v.9, N11, p.997.

18. Белелов А.Ф., Бубнов В.А., Ерухимов Л.М. и др. - Изв. вузов - Радиофизика, 1977, т. 20, № 12, с. 1805.
19. Васьков В.В., Гуревич А.В. - ЖЭТФ, 1975, т. 69, № № 1(7), с. 176.
20. Грач С.М., Караштин А.Н., Митяков Н.А., Рапопорт В.О., Трахтенгерц В.Ю. - Физика плазмы, 1978, т. 4, № 6, с. 1321.
21. Rao P.V., Thome G.D. - Radio Sci., 1974, v.9, N11, p.987.
22. Ерухимов Л.М., Метелев С.А., Митяков Н.А., Фролов В.Л. - Изв. вузов - Радиофизика, 1978, т. 21, № 12, с. 1739.
23. Гуревич А.В., Шварцбург А.В. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. - М.: Наука, 1973.
24. Альперт Я.Л. Распространение радиоволн в ионосфере. - М.: Наука, 1972.

Дата поступления статьи
17 августа 1983 г.

Валерий Алексеевич Алабастров
Евгений Андреевич Бенедиктов
Владимир Николаевич Иванов
Юрий Александрович Игнатьев
Сергей Михайлович Савельев
Александр Петрович Сливинский
Анатолий Сергеевич Терехов
Петр Борисович Шавин

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ИСКУССТВЕННОЙ
ИОНОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ МЕТОДОМ
НАКЛОННОГО РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ**

Подписано к печати 26.10.83 г. МЦ 24502. Формат 60 x 84
1/16, бумага писчая, печать офсетная, объем 1,74 усл. печ. л.
тираж 120, заказ 3021, бесплатно.

Отпечатано на ротапринте Горьковского научно-исследова-
тельского радиофизического института, 603600, Горький,
ГСП-51, ул. Лядова 25/14, т. 38-80-81, д. 5-09.