

П р е п р и н т   №   366

О ВОЗМОЖНОСТЯХ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ИСКУССТВЕННОЙ ИОНОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ  
С ПОМОЩЬЮ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ  
ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ

I. Экспериментальные результаты

В.Л.Фролов  
Г.Н.Бойко  
С.А.Метелев  
Е.Н.Сергеев

Фролов В. Л., Бойко Г. Н.,  
Метелев С. А., Сергеев Е. Н.

О ВОЗМОЖНОСТЯХ ИССЛЕДОВАНИЯ ИСКУССТВЕННОЙ ИОНОСФЕРНОЙ  
ТУРБУЛЕНТНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ  
ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ. I. Экспериментальные результаты // Препринт  
№ 366 – Нижний Новгород: НИРФИ, 1993. – 37 с.

Приведены результаты измерений характеристик искусственно го радиоизлучения ионосферной плазмы, инициируемого мощной импульс – ной радиоволной (диагностическое радиоизлучение). Определены за – висимости свойств диагностического радиоизлучения от параметр о в диагностической волны, ионосферных условий проведения эксперимен – та, уровня развития искусственной турбулентности, и даны критерии выбора оптимального режима зондирования ионосферной плазмы. При – ведены результаты экспериментов по зондированию искусстве н н о й ионосферной турбулентности с помощью диагностического радиоизлу – чения. Установлено, что с переходом ионосферы от дневных к вечер – ним условиям ее образования наблюдается резкое увеличение харак – терных времен его релаксации. Последнее, как предполагается, свя – зано с ростом естественной возмущенности F–области ионосферы.

## В В Е Д Е Н И Е

Одним из основных направлений в исследовании искусственной ионосферной турбулентности (ИИТ), возбуждаемой в F-области ионосферы вблизи уровня отражения мощной волны O-поляризации, является изучение свойств искусственного радиоизлучения ионосферной плазмы (ИРИ). Проведенные в последние годы детальные измерения его характеристик убедительно показали, что ИРИ имеет сложный (многокомпонентный) состав, отражающий развитие различного типа неустойчивостей в возмущенной области (ВО) ионосферы /1-9/. Также было установлено, что на его генерацию сильное влияние оказывают мелкомасштабные ( $l_{\perp} \leq 50$  м) искусственные ионосферные неоднородности и концентрации плазмы (МИИН), которые могут выступать, с одной стороны, в роли "источника" ИРИ, поддерживая его генерацию, а с другой стороны, определять уровень его поглощения за счет эффекта аномального ослабления (АО), выступая в роли "депрессора" излучения /4, 9, 10/. При этом каждая компонента излучения, обладая своими специфическими свойствами, по-своему реагирует на развитие и релаксацию спектра МИИН, что позволяет использовать ИРИ в качестве оперативного и достаточно простого метода измерения их характеристик /8/.

В развитие метода измерения характеристик ИИТ с помощью ИРИ в последние годы нашла широкое применение схема импульсного зондирования ВО ионосферы /10/. Идея использования данного зондирования заключается в том, что при наличии развитых МИИН, предварительно возбуждаемых во время достаточно длительного воздействия на ионосферную плазму мощным радиоизлучением, характерные времена генерации ИРИ составляют всего несколько миллисекунд и для измерения свойств ИИТ возможно использовать короткие диагностические импульсы с достаточно малой средней мощностью, которые не будут

вызывать дополнительных искусственных возмущений ионосферы и о плазмы, искажая динамику эволюции ИИТ.

Целью настоящей работы является определение характеристик и возможностей метода зондирования ИИТ с помощью диагностического ИРИ (ДИРИ), инициируемого короткими радиоимпульсами, зондирующими ВО ионосферы на частотах близких к частоте волны накачки (ВН). В первой части работы рассматривается общая схема зондирования ВО ионосферы с помощью ДИРИ. Во втором разделе на основе экспериментальных данных будут определены наиболее оптимальные характеристики для диагностической волны и проанализированы ограничения использования ДИРИ для зондирования ИИТ. Третий раздел посвящен рассмотрению особенностей суточного поведения характеристик ДИРИ, зависимости его свойств от частоты ВН и уровня развития ИИТ. В четвертом разделе приводятся результаты экспериментов по высотному сканированию ВО ионосферы с помощью ДИРИ. В заключении рассматриваются возможности предлагаемого метода диагностики ИИТ, кратко обсуждаются некоторые выводы относительно свойств ИИТ, следующие из проведенных измерений, и обсуждаются возможные направления дальнейших исследований.

## 1. СХЕМА ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

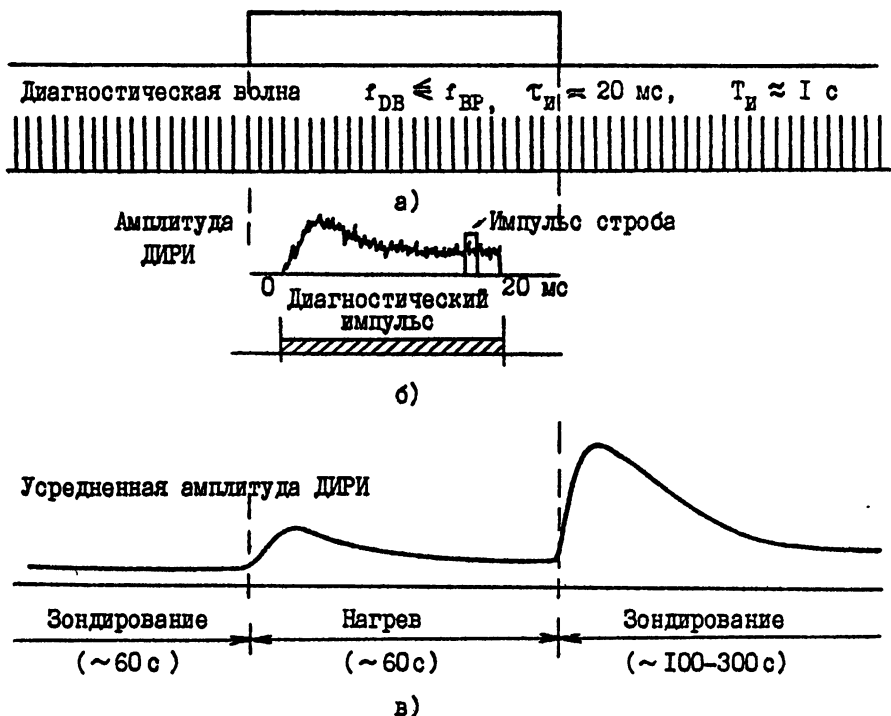
На рис. 1а приведена схема зондирования ВО ионосферы с помощью диагностического радиоизлучения. Здесь в течение сеанса измерений локация возмущений плазмы осуществляется с помощью импульсной диагностической волны, для которой, как правило, выбираются длительность импульса  $\tau_{\text{и}} \approx 20$  мс с периодом их повторения и  $T_{\text{и}} \approx 1$  с (требования к параметрам импульса диагностической волны подробно рассматриваются во второй части работы). Во время импульсного зондирования для создания высокого уровня ИИТ в течение нескольких десятков секунд осуществляется воздействие на ионосферную плазму мощным непрерывным радиоизлучением, частота которого в зависимости от решаемой задачи может совпадать или не совпадать с частотой диагностической волны. В условиях сильно развитой искусственной мелкомасштабной турбулентности, как отклик на излучение диагностической волны, за время  $\sim 10$  мс наблюдается установление стационарного уровня развития искусственного излучения. Характер изменения во времени амплитуды этого излучения (амплиту-

ды ДИРИ) показан на рис.1б для одной из выбранных отсроек излу - чения по спектру ДИРИ. Осуществляя временное стробирование амплитуды излучения для каждого импульса диагностической волны (я а в правило, измерение амплитуды ДИРИ в импульсе проводится, как показано на рис.1б, на стационарной стадии его развития), мы имеем дискретный набор измерений амплитуды принимаемого сигнала с периодом отсчета, равным тактовой частоте диагностических импульсов. Усредненный с помощью интегратора временной ход изменения амплитуды ДИРИ схематично показан на рис.1в. Здесь на интервале зондирования невозмущенной ионосферы (до включения ВН) амплитуда ДИРИ имеет постоянное значение. При включенной ВН, если частота диагностической волны близка к частоте ВН, динамика ДИРИ совпадает с динамикой развития излучения, обычно наблюдающейся в экспериментах по модификации ионосферы непрерывным радиоизлучением. После выключения ВН на стадии зондирования распадающейся низкочастотной турбулентности динамика ДИРИ, как это будет показано ниже, определяется многими факторами. Обычно наблюдается достаточно быстрое возрастание его амплитуды до некоторого максимального ее значения с последующей более медленной релаксацией до уровня, отвечающего случаю зондирования невозмущенной ионосферы. Поскольку релаксация высокочастотной плазменной турбулентности имеет характерные времена порядка нескольких миллисекунд /4, II/, то такая динамика ДИРИ после выключения ВН определяется динамикой мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН). Здесь рост амплитуды излучения связывается с исчезновением неоднородностей, обуславливающих действие "депрессора", а последующее уменьшение амплитуды определяется ослаблением его "источника". В этом случае, изменяя расстройку  $\delta f$  между частотой диагностической волны и частотой ВН ( $\delta f = f_{ДВ} - f_{ВН}$ ), можно осуществлять высотную локацию различных областей ИИТ.

Как ясно из рассмотренной выше схемы зондирования ВО с помощью ДИРИ, для решения поставленной задачи необходимо иметь как минимум два работающих независимо друг от друга передатчика, один из которых используется в качестве генератора ВН, а другой - в качестве генератора диагностической волны, зондирующей ВО ионосферы на различных частотах. В ряде случаев, когда осуществляется зондирование только центральной части ВО и  $f_{ДВ} = f_{ВН}$ , излучен и е как ВН, так и диагностической волны возможно с помощью т о л ь к о одного передатчика, изменяя во время сеанса с помощью схемы у п -

равления импульсный режим его работы на режим излучения непрерывной волны.

Волна накачки



Р и с. I

Рассматриваемые нами результаты экспериментальных исследований были выполнены на стенде "Сура" (Нижний Новгород), конструктивной особенностью которого является возможность независимой работы трех передатчиков, каждый на свою секцию передающей антенны  $/I2/$ . При этом, настраивая передатчики каждый на свою частоту, мы могли либо использовать все три передатчика в комбинированном режиме излучения "зондирование - нагрев - зондирование" с нулевыми расстройками по частоте диагностической волны и ВЧ для каждого модуля, либо использовать один (или два) передатчика для излуче-

ния ВН и диагностической волны с нулевой отстройкой  $\delta f$ , а два (один) другие передатчика для излучения диагностических волн на частотах, отличающихся от  $f_{\text{ВН}}$ . В первом случае области искусственных возмущений образовывались на трех различных высотах ионосферы и здесь имелась возможность параллельного измерения свойств ДИРИ в зависимости от  $f_{\text{ВН}}$  и высоты ВО. При постановке таких измерений разность частот между соседними значениями  $f_{\text{ВН}}$  выбиралась более, чем 0,5 МГц, чтобы избежать влияния эффектов ансмального ослабления (АО) радиоволн, проходящих через области с ИИТ. Вторая схема измерений использовалась нами при высотном сканировании ВО ионосферы, когда проводились исследования зависимости т и свойств ДИРИ от смещения относительно центра ВО.

## 2. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ

В экспериментах по исследованию свойств ИИТ с помощью ДИРИ большое значение имеет правильность выбора характеристик диагностической волны. Как уже указывалось выше, средняя мощность зондирующего излучения должна быть достаточно малой, чтобы исключалась возможность ее влияния на свойства МИИИ, возбуждаемых ВН в режиме ее непрерывного излучения. В то же время для полного формирования спектра ДИРИ (спектра высокочастотной плазменной турбулентности во время диагностического импульса) импульсная мощность диагностической волны должна быть достаточно высокой. С целью выбора оптимального режима зондирования ВО ионосферы рассмотрим результаты некоторых экспериментальных исследований.

### 2.1. Спектральные характеристики ИРИ и ДИРИ

Выполненные измерения показали, что при зондировании возмущенной ионосферы (режим зондирования до включения ВН (см. рис. 1)) наблюдается очень узкий спектр излучения, сосредоточенный, главным образом, в области малых отрицательных отстроек относительно  $f_{\text{зонд}}$  ( $\Delta f^- = f_{\text{ДИРИ}} - f_{\text{зонд}} \leq 10-20$  кГц), по своим характеристикам отвечающий узкополосной ("нетепловой") компоненте ИРИ /4, 10/. В условиях развитых МИИИ спектры ИРИ и ДИРИ при  $f_{\text{зонд}} \approx f_{\text{ВН}}$  совпадают, простираясь на несколько десятков кГц ниже частоты зондирования. В этом случае свойства ДИРИ в значительной степени и

определяются характеристиками ИИТ, возбуждаемой мощной радиоволной.

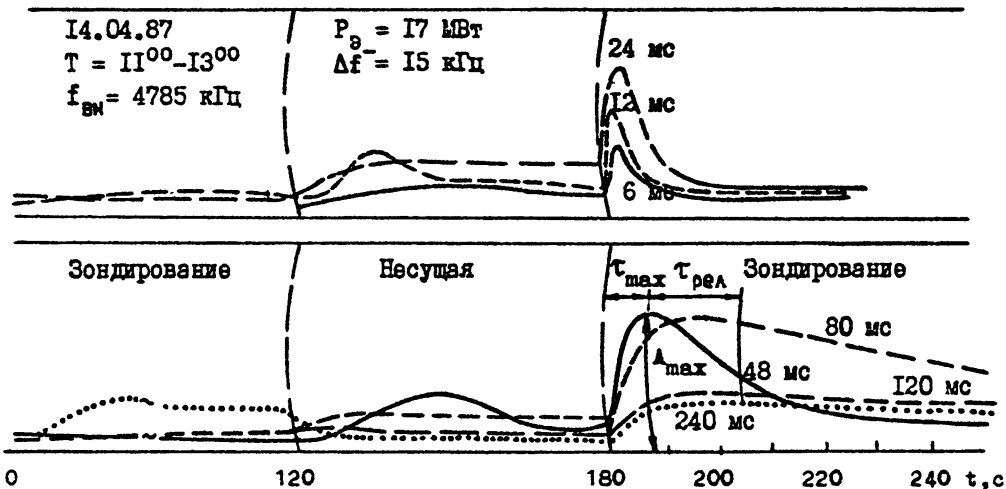
## 2.2. Зависимость свойств ДИРИ от длительности зондирующего импульса

На рис.2 представлены результаты одной серии измерений, в которой длительность зондирующих импульсов ( $\tau_n$ ) изменялась в интервале от 6 до 240 мс при сохранении периода их повторения  $T_n = 480$  мс. Частота излучения для режима зондирования и периода нагрева ионосферной плазмы была одинаковой и равнялась 4785 кГц; для обоих режимов максимальная эффективная мощность излучения составляла 17 МВт. Длительность цикла измерений составляла 10 мин для каждой длительности импульсов зондирующей волны. Зондирование невозмущенной ионосферы осуществлялось в течение 2 минут, после чего в течение 1 минуты проводилось воздействие на ионосферную плазму мощным непрерывным радиоизлучением (режим "несущая"). Зондирование ВО ионосферы после выключения ВН продолжалось также 2 минуты, общая пауза в излучении составляла 5 минут, во время которой восстанавливалось невозмущенное состояние ионосферной плазмы. На всех трех стадиях цикла (зондирование, нагрев, зондирование) последовала эволюция излучения и ее вариации при изменении длительности зондирующего импульса.

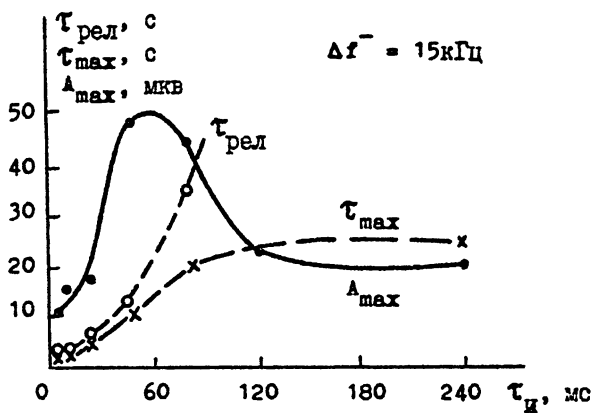
Из рис.2а хорошо видно, что после выключения ВН ( $t = 180$ с на рисунке) и перехода в режим зондирования ВО при всех значениях  $\tau_n$  интенсивность ДИРИ вначале резко возрастает, достигает своего максимума, а затем начинает уменьшаться до своего стационарного значения, отвечающего интенсивности излучения при зондировании невозмущенной ионосферы. Как отмечалось выше, такое поведение амплитуды ДИРИ является наиболее характерным и объясняется исчезновением сначала "депрессора", уменьшающего интенсивность ДИРИ на стационарной стадии развития ИИТ, а затем и "источника", поддерживающего его генерацию. Свойства ДИРИ на стадии релаксации ИИТ в этом случае можно характеризовать тремя параметрами: величиной максимальной амплитуды  $A_{max}$ , достигаемой через время  $\tau_{max}$  после окончания непрерывного воздействия на ионосферную плазму, а также характерным временем релаксации амплитуды ДИРИ  $\tau_{rel}$  после максимальной фазы его развития, определяемым временем уменьшения амплитуды



литуды в е раз (см. обозначения на кривой для  $\tau_M = 48$  мс). Зависимости  $A_{max}$ ,  $\tau_{max}$  и  $\tau_{rel}$  от длительности импульса ВЧ для приведенного на рис. 2а цикла исследований представлены на рис. 2б.



а)



б)

Р и с. 2

Приведенные на рис.2 результаты измерений позволяют сделать несколько важных выводов. Вначале, при  $\tau_{и} \approx 24$  мс, наблюдается достаточно слабая зависимость характерных времен эволюции ДИРИ при увеличении длительности зондирующего импульса. Далее время на  $\tau_{max}$  начинают достаточно быстро нарастать и при  $\tau_{и} \approx 60$  мс наступает стабилизация их значений с  $\tau_{max} \approx 25$  с, в то время как с ростом  $\tau_{и}$  величина  $\tau_{rel}$  непрерывно увеличивается во все более нарастающем темпе. Более сложно ведет себя зависимость амплитуды ДИРИ  $A_{max}$  от  $\tau_{и}$ . Для  $\tau_{и} \approx 48$  мс наблюдается быстрое ее увеличение с ростом длительности зондирующего импульса, затем амплитуда ДИРИ на интервале  $\tau_{и} = 48-120$  мс уменьшается и при  $\tau_{и} \approx 120$  мс наступает стабилизация ее значений.

Рассмотренные выше результаты измерений показывают, что при  $T_{и} = 480$  мс уже начиная с  $\tau_{и} \approx 24$  мс свойства ДИРИ в значительной степени определяются длительностью зондирующего импульса, а при  $\tau_{и} \approx 48$  мс это влияние становится уже настолько сильным, что коренным образом изменяет характер эволюции ИИТ на стадии ее релаксации после выключения НН. Последнее может быть интерпретировано как поддержание уровня МИИН в ВО ионосферы за счет энергии импульсов диагностической волны, и, следовательно, при  $\tau_{и} \approx 24$  мс в данном эксперименте импульсное излучение уже нельзя считать чисто диагностическим.

На рис.2 приведены результаты измерений для одной отстройки и частоты ДИРИ  $\Delta f^- = 15$  кГц, относящейся к области главного спектрального максимума излучения /1, 3-5/. Обработка результатов измерений для других отстроек  $\Delta f^-$  показывает, что при уменьшении длительности импульса зондирующего излучения меньше 20 мс спектр ДИРИ начинает резко обужаться за счет исчезновения излучения в области  $\Delta f^- > 20$  кГц при практически сохраняющейся его интенсивности в области главного спектрального максимума. Отмечается также, что с ростом величины отстройки  $\Delta f^-$  максимальная амплитуда ДИРИ  $A_{max}$  достигает своих пиковых значений при больших длительностях импульса зондирующего излучения: при  $\tau_{и} = 60$  мс для  $\Delta f^- = 30$  кГц по сравнению с  $\tau_{и} = 48$  мс для  $\Delta f^- = 15$  кГц.

Следующий важный момент, на который необходимо обратить внимание, это изменение характера развития ИРИ во время минутного воздействия на ионосферную плазму в режиме "несущая" в зависимости от длительности импульса зондирующего излучения. Нетрудно видеть,

что, хотя амплитуда ДИРИ в режиме предварительного зондирования и я до включения ВН практически не изменилась при увеличении длительности импульса  $\tau_{и}$  от 6 мс до 120 мс, динамика излучения после включения "несущей" показывает свою сильную зависимость от длительности зондирующих импульсов, когда  $\tau_{и} \approx 10-20$  мс. Следовательно, двухминутное зондирование ионосферы с помощью диагностической волны здесь можно рассматривать как предварительное возмущение плазмы импульсной ВН, оказывающей влияние на характер развития ИИТ при включении непрерывной ВН. Отметим, что ранее при исследовании характера генерации ИИТ с помощью метода пробных волн нами были получены аналогичные результаты /13, 14/. В этих исследованиях наблюдаемое явление интерпретировалось как генерация мелкомасштабных неоднородностей вблизи уровня отражения ВН за счет самофокусирующей неустойчивости плазменных волн, генерируемых на стадии развития стрикционной параметрической неустойчивости.

Рассмотренные выше экспериментальные данные о влиянии импульсного излучения зондирующей волны на свойства ИИТ, развивающейся при включении непрерывной ВН, еще раз указывают на то, что для  $T_{и} = 480$  мс уже при  $\tau_{и} \approx 10$  мс энергия диагностической волны может оказывать влияние на свойства ИИТ и, в частности, поддерживать уровень МИИИ после окончания воздействия в режиме "несущая".

Приведенные результаты измерений относятся к случаю, когда период повторения зондирующих импульсов был равен 480 мс. Несомненно, что с изменением  $T_{и}$  параметры, характеризующие динамику ДИРИ, будут изменяться, причем таким образом, что с уменьшением  $T_{и}$  зондирующее излучение будет оказывать все более сильное влияние на эволюцию ИИТ.

Оценим среднюю мощность импульсного излучения, выше которой влияние диагностической волны резко возрастает. Для данных, представленных на рис.2, это имеет место при  $\tau_{и} > 24$  мс, или  $\langle P \rangle = \frac{\tau_{и}}{T_{и}} \cdot P_{и} = 0,85$  МВт. Это значение  $\langle P \rangle$  с учетом линейного поглощения радиоволн в нижней ионосфере может быть достаточно близко к порогу срыва генерации искусственных мелкомасштабных неоднородностей:  $P_{пор.ср} \approx 0,5$  МВт /7, 15/. Следовательно можно предполагать, что при  $\tau_{и} \approx 24$  мс средняя мощность диагностической волны оказывается достаточной для поддержания МИИИ на стадии их релак-

сации после выключения ВН. Это должно приводить к увеличению времени их распада при не слишком больших длительностях импульса мощной волны, когда  $\tau_{и} \leq 48$  мс, и прямому поддержанию уровня МИИИ при достаточно малой скважности посылок для  $\tau_{и} \geq 80$  мс (см. рис. 2).

### 2.3. Зависимость характеристик ДИРИ от мощности зондирующего импульса

При проведении этих исследований длительность диагностического импульса была равной 12 мс, период их повторения  $T_{и} = 200$  мс. Анализировались характеристики ДИРИ для отстройки  $\Delta f_{и} = 15$  кГц. Мощность ВН во всех циклах измерений была равна 17 МВт, в то время как мощность зондирующих импульсов изменялась от цикла к циклу в пределах от 0,3 до 17 МВт. Было получено, что в интервале  $P_{и} = 1,7 - 17$  МВт пиковое значение максимальной амплитуды ДИРИ ( $A_{\max}$ ) достаточно слабо возрастает с увеличением мощности зондирующего импульса. Здесь зависимость  $A_{\max}(P_{и})$  можно представить в степенном виде:  $A_{\max} \propto P_{и}^{\alpha}$ , где  $\alpha \approx 0,2$ . В области значений  $P_{и} < 1,7$  МВт интенсивность ДИРИ для максимальной фазы его развития резко уменьшается с уменьшением мощности зондирующего импульса.

В данном эксперименте, если учесть линейное поглощение радиоволн в нижних слоях ионосферы, уменьшающее поток проходящего в F-область излучения приблизительно в 3 раза, мощность  $P_{и} = 1,7$  МВт была близка к пороговой мощности индуцированного рассеяния плазменных волн (ИР), равной  $\sim 1 + 0,5$  МВт / 9, 15/. Выполнение условия  $P_{и} > P_{\text{пор}}(\text{ИР})$  представляется очевидным и следует из необходимости формирования спектра плазменных волн, инициируемых диагностической волной вблизи уровня верхнегибридного резонанса для ВН. Представляется очевидным также, что с уменьшением интенсивности и МИИИ на стадии их распада после выключения ВН пороговая мощность срыва ТПН будет увеличиваться, и на определенной стадии релаксации неоднородностей мощности диагностической волны может оказаться недостаточной для возбуждения всего спектра высокочастотной плазменной турбулентности. При этом произойдет резкое обухение спектра ДИРИ до вида, отвечающего узкополосной компоненте излучения. В силу вышесказанного, необходимо иметь, по крайней мере, трех-пятикратное превышение  $P_{и}$  над  $P_{\text{пор}}(\text{ИР})$ , или для ре-

альных ионосферных экспериментов должно выполняться условие  $P_3 \approx 5-10$  МВт.

#### 2.4. Характер эволюции ИРИ на начальном этапе взаимодействия ВН с плазмой в условиях развитой ионосферной турбулентности

При проведении этой серии измерений был выбран режим излучения ВН с короткими паузами и длинными периодами нагрева: 180 мс – нагрев, 20 мс – пауза, так что средняя мощность ВН мало отличалась от режима "несухая". Измерения проводились при различных уровнях мощности ВН в послеполуденные и вечерние часы в диапазоне отстроек ИРИ от  $-10$  кГц до  $-80$  кГц. В этих измерениях мы не использовали дополнительного зондирования ВО ионосферы с помощью диагностической волны, а ограничились исследованием только характера развития ИРИ после короткой 20 мс паузы излучения ВН, в условиях стационарного уровня МИИИ, устанавливавшегося через несколько десятков секунд после начала воздействия.

Измерения показали, что через 5–10 мс после включения очередного импульса ВН наблюдается появление максимума интенсивности ИРИ, после чего за время порядка 10–20 мс амплитуда излучения уменьшается до своего стационарного значения (см. рис. 1б). Здесь меньшие значения характерных времен развития ИРИ отвечают своим дневным значениям. Они также зависят от мощности ВН, уменьшаясь с ее увеличением, хотя эта зависимость носит достаточно слабый характер. Существенно более сильно характерные времена развития ИРИ зависят от величины расстройки  $\Delta f^-$ , увеличиваясь для времени и максимума его интенсивности от 5–10 мс для  $\Delta f^- \approx 10$  кГц до 20–30 мс для  $\Delta f^- \approx 40-50$  кГц при  $P_3 \approx 20$  МВт.

Проведенные исследования показали, что даже при полной мощности ВН  $P_3 \approx 150$  МВт время формирования спектра высокочастотной плазменной турбулентности в условиях развитой мелкомасштабной искусственной ионосферной турбулентности составляет  $\sim 5-30$  мс, где меньшие значения соответствуют дневным, а большие – вечерним часам наблюдений.

## 2.5. Выбор параметров диагностической волны

Суммируем выводы, следующие из рассмотренных выше экспериментальных данных, с точки зрения определения оптимальных параметров диагностической волны в экспериментах по зондированию В0 ионосферы.

Для решения большинства стоящих задач, связанных с диагностикой МИИИ, нам необходимо иметь временное разрешение в измерениях с помощью ДИРИ не хуже, чем 1 с, поскольку, как известно /7/, характерные времена релаксации искусственных неоднородностей с  $\tau_1 \approx 3$  м составляют  $\sim 1$  с, или  $T_{\text{и}} \approx 0,2-1$  с. Выше мы также назвали, что мощность зондирующего импульса должна быть не меньше 5-10 МВт (вообще говоря, уровень мощности диагностической волны должен определяться с учетом величины линейного поглощения радиоволн в нижней ионосфере, поэтому приведенные здесь значения  $P_{\text{и}}$  являются лишь оценочными), а длительность зондирующего импульса должна быть не меньше 20-30 мс. Однако легко видеть, что даже для  $T_{\text{и}} = 500$  мс,  $\tau_{\text{и}} = 40$  мс и  $P_{\text{и}} = 10$  МВт средняя мощность излучения диагностической волны составит 0,8 МВт, что, как показывают рассмотренные выше измерения, оказывается достаточным для поддержания интенсивности МИИИ в В0 ионосфере.

Сделанные выше оценки показывают, что на практике не удается реализовать чисто диагностический режим для исследования свойств ИИТ с помощью ДИРИ. Поэтому при проведении измерений мы, как правило, выбирали длительность, период и мощность зондирующего импульса равными:  $\tau_{\text{и}} = 15-20$  мс,  $T_{\text{и}} = 1$  с и  $P_{\text{и}} = 5-10$  МВт, стремясь свести к минимуму дополнительное возмущение ионосферной плазмы в режиме зондирования, понимая, что при этом высокочастотная плазменная турбулентность может не достигать своего полного развития. Последнее, в первую очередь, должно касаться результатов измерений свойств излучения с большими отрицательными отстройками относительно частоты зондирования (для  $\Delta f^- \geq 30$  кГц), при интерпретации которых необходимо проявлять особую внимательность.

В заключении заметим, что, как это теперь ясно, используемый в работе /10/ режим зондирования В0 с  $\tau_{\text{и}} = 18$  мс,  $T_{\text{и}} = 180$  мс и  $P_{\text{и}} = 20$  МВт обеспечивал поддержание МИИИ после окончания воздействия в режиме "несущая". Это приводило к замедлению темпа релаксации искусственных неоднородностей в В0 ионосфере, а следова-

тельно - в зави́сении оценок масштаба  $\zeta_1$  для неоднородностей, отвечающих за "источник" и "депрессор" излучения.

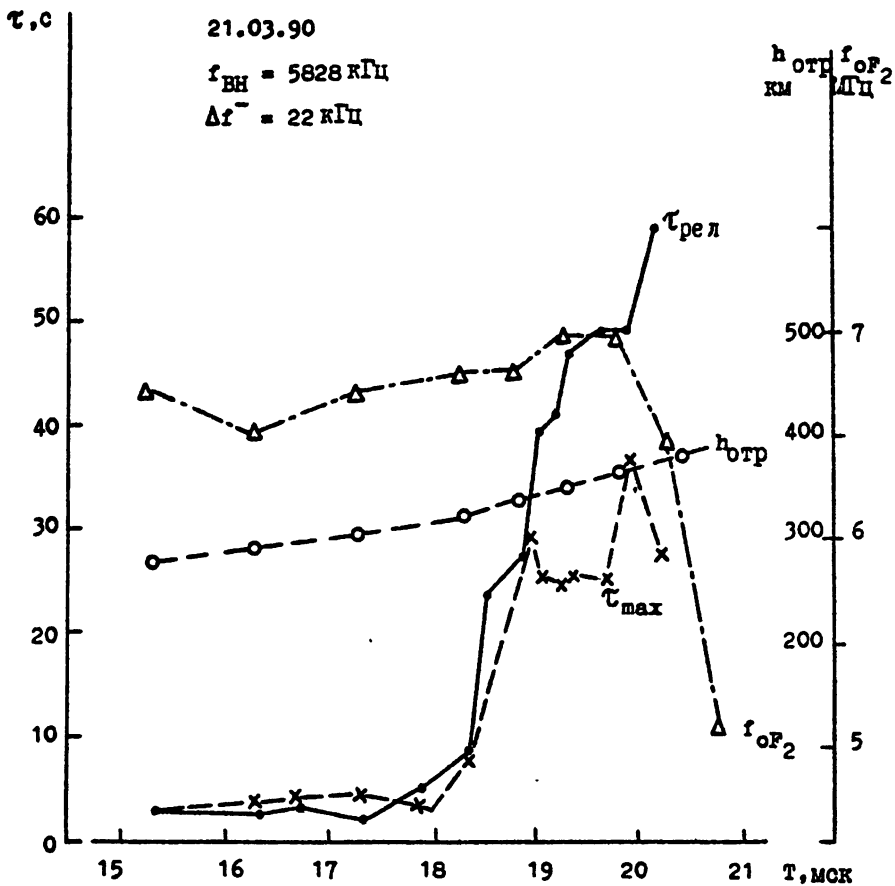
### 3. ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ДИРИ

Как показали первые проведенные исследования /16/, динамика ДИРИ определяется многими факторами. Здесь, в первую очередь, следует отметить ее зависимость от частоты ВН, уровня развития ИИГ, высоты отражения ВН и величины градиента электронной концентрации плазмы, а также значения отстройки частоты ДИРИ относительно  $f_{\text{ВН}}$ . Выполненные в последние годы на нагревном стенде "Сура" эксперименты позволили получить новые достаточно обширные сведения о характеристиках ДИРИ, изложению и анализу которых посвящен данный раздел работы.

#### 3.1. Суточная зависимость свойств ДИРИ

3.1.1. На рис.3а, б, в по одновременным измерениям на трех различных частотах ВН (5828, 5455 и 4785 кГц) для величины отстройки ДИРИ  $\Delta f \approx 20$  кГц приведены результаты измерений характерных времен эволюции ДИРИ  $\tau_{\text{max}}$  и  $\tau_{\text{rel}}$ , выполненных в марте 1990 г. в послеполуденные и вечерние часы. Здесь же по данным обработки и ионограмм построены ход изменения высоты отражения ВН ( $h_{\text{отр}}$ ), критической частоты  $F_2$ -слоя ионосферы ( $f_{0F_2}$ ), а также для  $f_{\text{ВН}} = 5455$  и 4785 кГц приведены результаты измерения характерного времени релаксации эффекта аномального ослабления (АО) ( $\tau_{\text{rel}}(\text{АО})$ ), измеренного с помощью метода пробных волн. Анализ экспериментальных данных позволяет сделать следующие выводы.

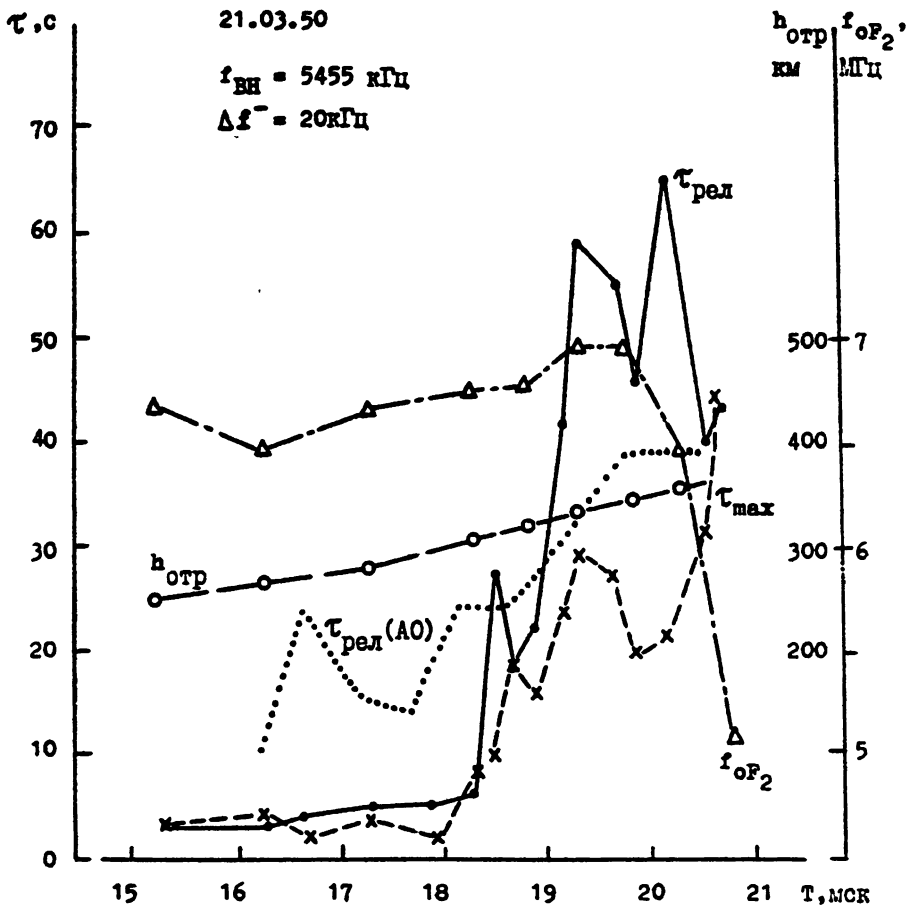
На интервале времени 15.00-18.00 характерные времена эволюции ДИРИ сохраняли постоянными свои значения:  $\tau_{\text{max}} \approx 3-4$  с и  $\tau_{\text{rel}} \approx 2-5$  с, возможно лишь очень слабо увеличиваясь с ростом  $f_{\text{ВН}}$  и при приближении к вечерним часам. Около 18.00 местного времени и наблюдалось резкое увеличение их значений практически одновременно для всех частот ВН. Можно утверждать, что после 19.00 для времени кульминации амплитуды ДИРИ  $\tau_{\text{max}}$  устанавливаются новые и хвезистационарные значения, для которых характерен рост  $\tau_{\text{max}}$  с ростом  $f_{\text{ВН}}$ :  $\tau_{\text{max}} \approx 14, 22$  и 28 с, соответственно, для  $f_{\text{ВН}} = 4785, 5455$  и 5828 кГц. В среднем значения  $\tau_{\text{max}}$  увеличивается в



а )

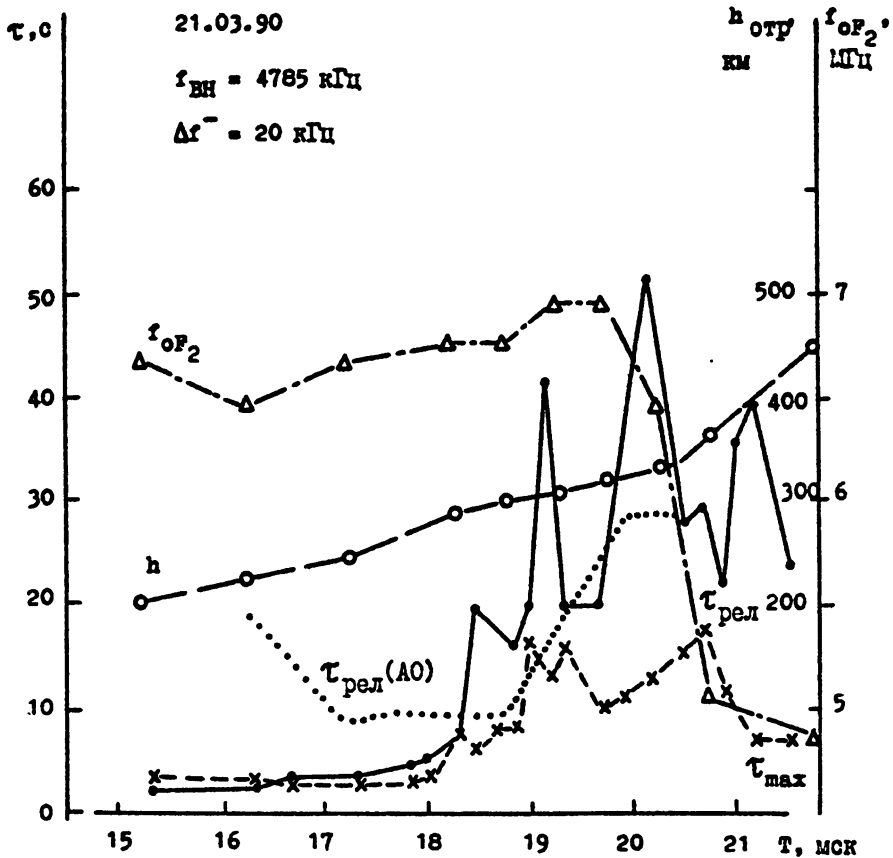
Р и с . 3





б)

Р и с. 3



в )

Р и с. 3

4-7 раз по сравнению с их дневными значениями. Еще более значи-тельно (в 10-20 раз) при переходе через время 18.00 увеличивается характерное время релаксации ДИРИ  $\tau_{\text{рел}}$ . Отмечается также, что ширина интервала вариаций значений  $\tau_{\text{max}}$  и  $\tau_{\text{рел}}$  в вечерние часы наблюдений увеличивается, и их период здесь составлял в среднем около 30 с.

Аналогичный резкий рост времен  $\tau_{\text{max}}$  и  $\tau_{\text{рел}}$  при переходе от дневных к вечерним часам наблюдений был зарегистрирован также и во время наших измерений в апреле и сентябре 1991 года.

Как показал анализ экспериментальных данных и ионосферных условий, этот резкий рост значений  $\tau_{\text{max}}$  и  $\tau_{\text{рел}}$  не может быть связан с изменением транспортируемой в верхнюю ионосферу мощности ВН, поскольку линейное поглощение радиоволн наиболее резко уменьшалось на интервале времени 15.00-17.00, когда наблюдалось постоянство их значений; и наоборот, оно практически полностью исчезало к 18.00, когда имело место резкое изменение значений  $\tau_{\text{max}}$  и  $\tau_{\text{рел}}$ . Рост  $\tau_{\text{max}}$  и  $\tau_{\text{рел}}$  не может быть также связан с приближением уровня отражения ВН к высоте максимума  $F_2$ -слоя ионосферы и как следствие этого - с изменением градиента концентрации плотности плазмы в В0, поскольку, как видно из рис.3, вблизи 18.00 не происходило существенных изменений ни  $f_{0F_2}$ , ни  $h'_{\text{отр}}$ . Кроме того, суточные вариации профиля плотности плазмы должны были бы по-разному проявляться на разных частотах ВН. Мы также должны исключить возможность объяснения разного увеличения значений  $\tau_{\text{max}}$  и  $\tau_{\text{рел}}$  за счет увеличения времен релаксации МИИИ в В0 ионосферы при переходе от дневной к ночной ионосфере, поскольку, как показывают измерения [7], этот рост имеет достаточно плавный характер, а отношение ночных значений времен релаксации МИИИ к дневным не превышает 1,5-2. Последнее можно видеть по изменению характерных времен релаксации эффекта А0, представленных на рис.3б и 3в.

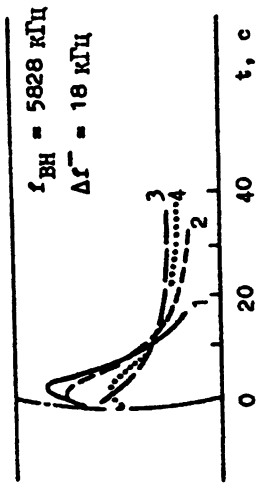
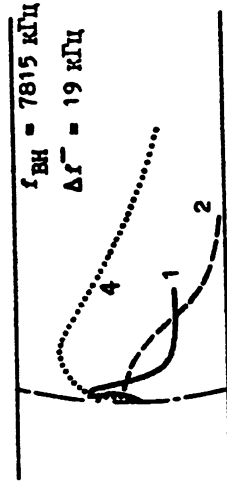
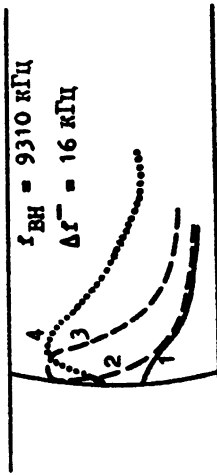
В настоящее время нет полной интерпретации наблюдаемого явления. Не вызывает сомнений, что оно связано с перестройкой ионосферы от дневных к вечерним условиям ее образования, которая сопровождается значительным усилением уровня ее естественной возмущенности. В этом смысле полученные результаты могут указывать на резкое изменение условий генерации естественных мелкомасштабных неоднородностей плазмы. Последнее может вызвать усиление эффекта поддержания МИИИ за счет энергии диагностической волны и тем в

большей степени, чем в более поздние вечерние часы мы проводим измерения. Об этом может свидетельствовать непрерывное возрастание времен релаксации ДИРИ  $\tau_{\text{рел}}$ . Однако для окончательного решения этого вопроса необходимо проведение более тщательного исследования свойств ДИРИ и особенно в ночной ионосфере. Ясно, что отсутствие полного понимания особенностей динамики ДИРИ в значительной степени сужает в настоящее время возможности использования рассматриваемого метода диагностики как искусственной, так и естественной турбулентности ионосферной плазмы.

3.1.2. Исследования суточной зависимости динамики ДИРИ показали, что далеко не во всех сеансах измерений наблюдается формирование его максимума после окончания нагрева ионосферной плазмы в режиме "несущая". Особенно это касается дневных часов наблюдений.

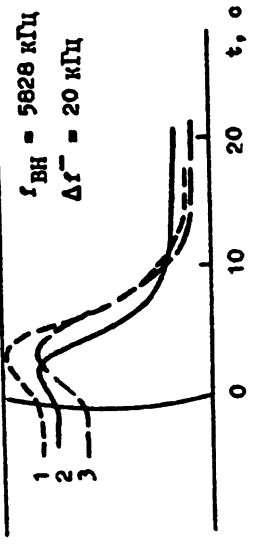
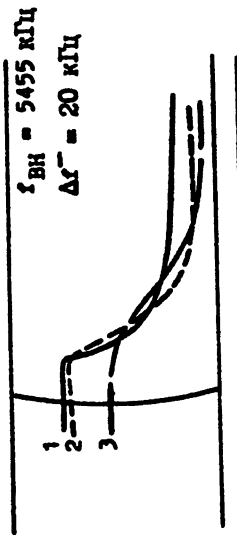
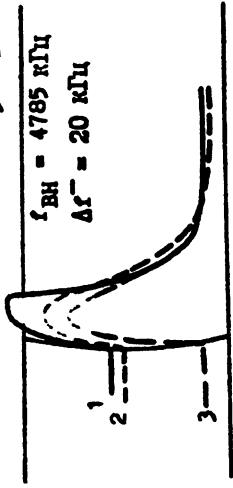
Обратимся к рис.4, где для двух циклов измерений представлена эволюция амплитуды ДИРИ в зависимости от времени суток и частоты ВЧ. В этой серии экспериментов использовался режим одновременного излучения трех частот ВЧ каждая со своей секции передающей антенны нагревного стенда: 9310, 7815 и 5828 кГц (рис.4а) и 5828, 5455 и 4785 кГц (рис.4б). После минутного возмущения ионосферной плазмы в режиме "несущая" все передатчики переводились в режим излучения диагностической волны на той же самой частоте, что и соответствующая частота ВЧ. Сигналы ДИРИ записывались на отстройках  $\Delta f \approx 18-20$  кГц. Исследования показали, что, в среднем, (см.рис.4а) максимум в динамике ДИРИ появляется в более позднее время суток для более высокой частоты ВЧ, причем при переходе к вечерним часам сначала наблюдается формирование своеобразного "плато" с сохранением постоянной амплитуды излучения некоторое время после выключения ВЧ, и только позднее мы наблюдаем появление максимума в динамике ДИРИ, причем всегда вначале выполняется условие  $\tau_{\text{max}} = \tau_{\text{пл}}$ . Такая картина наиболее четко прослеживается на более высоких частотах ВЧ (см.рис.4а,  $f_{\text{ВЧ}} = 9310$  кГц), для которых в условиях дневной ионосферы стадия релаксации амплитуды излучения начиналась сразу после выключения ВЧ. Из рис.4 также видно, что с уменьшением  $f_{\text{ВЧ}}$  контрастность максимума ДИРИ относительно уровня стационарного излучения во время несущей увеличивается. Кроме того отмечается, что время  $\tau_{\text{max}}$  увеличивается с

20.03.90 1 - T = 15<sup>01</sup> 2 - T = 16<sup>01</sup>  
 3 - T = 17<sup>01</sup> 4 - T = 18<sup>01</sup>



а)

21.03.90 1 - T = 15<sup>21</sup> 2 - T = 16<sup>21</sup>  
 3 - T = 17<sup>21</sup>



б)

Р и с. 4

ростом  $f_{\text{вн}}$  (возможно  $\tau_{\text{max}} \propto f_{\text{вн}}$ , но этот вывод нуждается в проверке).

Во второй серии измерений для более низких значений  $f_{\text{вн}}$ , представленных на рис.46, обращает на себя внимание отсутст в и е максимума ДИРИ на средней частоте  $f_{\text{вн}} = 5455$  кГц. Этот резуль - тат может свидетельствовать о наличии существенных вариаций в ди - намики ДИРИ в некоторых локальных областях измерения  $f_{\text{вн}}$ , ч т о возможно было связано с близостью частоты ВН к гармонике гирочастоты электронов ( $4 f_{\text{сн}} \approx 5,3$  МГц). Во всяком случае, как пока - зывают измерения свойств ИРИ /3/, сильные вариации его спектраль - ных характеристик наблюдаются в достаточно широкой области отстро - ек (порядка  $\pm 100$  кГц)  $f_{\text{вн}}$  относительно частоты гирорезонанса, и для этих областей частот необходимо провести более детальные из - мерения характеристик ДИРИ.

3.1.3. Проанализируем более подробно связь между динамикой и ДИРИ и характерным временем релаксации эффекта А0 (см.рис.46 и в). Из сопоставления  $\tau_{\text{рел}}$  (А0) и характерных времен эволюции Д И Р И следует, что в дневные часы наблюдений до момента, когда начина - ется резкий рост значений  $\tau_{\text{max}}$  и  $\tau_{\text{рел}}$ , значения  $\tau_{\text{рел}}$  (А0) прак - тически совпадают с временем установления стационарного уровн я амплитуды ДИРИ, отвечающей узкополосной компоненте излуче н и я. То есть в данном случае полное время релаксации ДИРИ ( $\tau_{\text{tot рел}} \approx \approx \tau_{\text{max}} + 2 \tau_{\text{рел}}$ ) или время релаксации "источника", подде р - живающего генерацию излучения, совпадает с временем релаксации де - каметровых МИИИ, обуславливающих эффект А0 радиоизлучения в В 0 ионосферы /17/. В более поздние вечерние часы наблюдений после резкого возрастания значений  $\tau_{\text{max}}$  и  $\tau_{\text{рел}}$  характерное время ре - лаксации эффекта А0 уже более соответствует времени установлен и я максимальной амплитуды ДИРИ, как например, это следует из рис.36. При этом мы должны считать, что неоднородности, ответствен н ы е за эффект А0, определяют здесь время жизни "депрессора", обуслав - ливающего подавление излучения. Такое изменение соотношения между характерными временами эволюции ДИРИ и релаксации эффекта А0 не имеет в настоящее время своей однозначной интерпретации. Наиболее вероятно, что здесь определяющее влияние оказывает изменение спек - тральных характеристик МИИИ при переходе от дневной к ночн ой ионосфере, при котором наблюдается усиление интенсивности флукту -

вией плотности плазмы в области масштабов  $l_1 \approx 3-5$  м. Последнее, как показывают численные расчеты, может оказывать определяющее влияние на условия генерации излучения в ВО ионосферы, а также — изменять его динамику. Однако для окончательного решения данного вопроса необходимо продолжить начатые исследования.

### 3.2. Зависимость характеристик ДИРИ от уровня развития ИИТ

До сих пор мы рассматривали свойства ДИРИ, когда в результате нагрева плазмы мощным радиоизлучением мелкомасштабная часть спектра ИИТ успевала достичь своего стационарного состояния. С целью изучения влияния уровня развития ИИТ на характеристики ДИРИ нами была выполнена серия измерений, когда в качестве ВН использовалось прерывистое излучение, длительность посылок которого изменялась от сеанса к сеансу.

Рассмотрим представленные на рис.5 экспериментальные данные, где для трех отстроек ДИРИ  $\Delta f^- = 7, 27$  и  $62$  кГц показана динамика излучения при трех режимах работы мощных передатчиков: 180 мс — излучение, 20 мс — пауза (режим квазинепрерывного нагрева ионосферной плазмы); 100 мс — излучение, 100 мс — пауза (режим меандра); 20 мс — излучение, 180 мс — пауза (режим импульсного воздействия на ионосферную плазму). В этой серии измерений длительность диагностических импульсов составляла 20 мс, период их повторения — 1 с. Нагрев ионосферной плазмы осуществлялся в течение 2 минут, после чего в течение нескольких минут излучалась диагностическая волна. Эффективная пиковая мощность излучения ВН и диагностической волны с учетом линейного поглощения радиоволн в нижней ионосфере составляла порядка 10–20 МВт. В этом эксперименте проводился независимый контроль уровня и скорости развития ИИИИ с помощью измерения характеристик эффекта А0: в случае квазинепрерывного нагрева ионосферной плазмы имело место развитие быстрого А0 с характерным временем  $\tau_{\text{в.А0}} \approx 1$  с и величиной ослабления  $\sim 15$  дБ; для нагрева ионосферы в режиме меандр время развития эффекта А0 составляло  $\sim 10$  с при уровне ослабления  $\sim 9$  дБ; при импульсном режиме нагрева плазмы эффект А0 на отраженном сигнале ВН не обнаруживался.

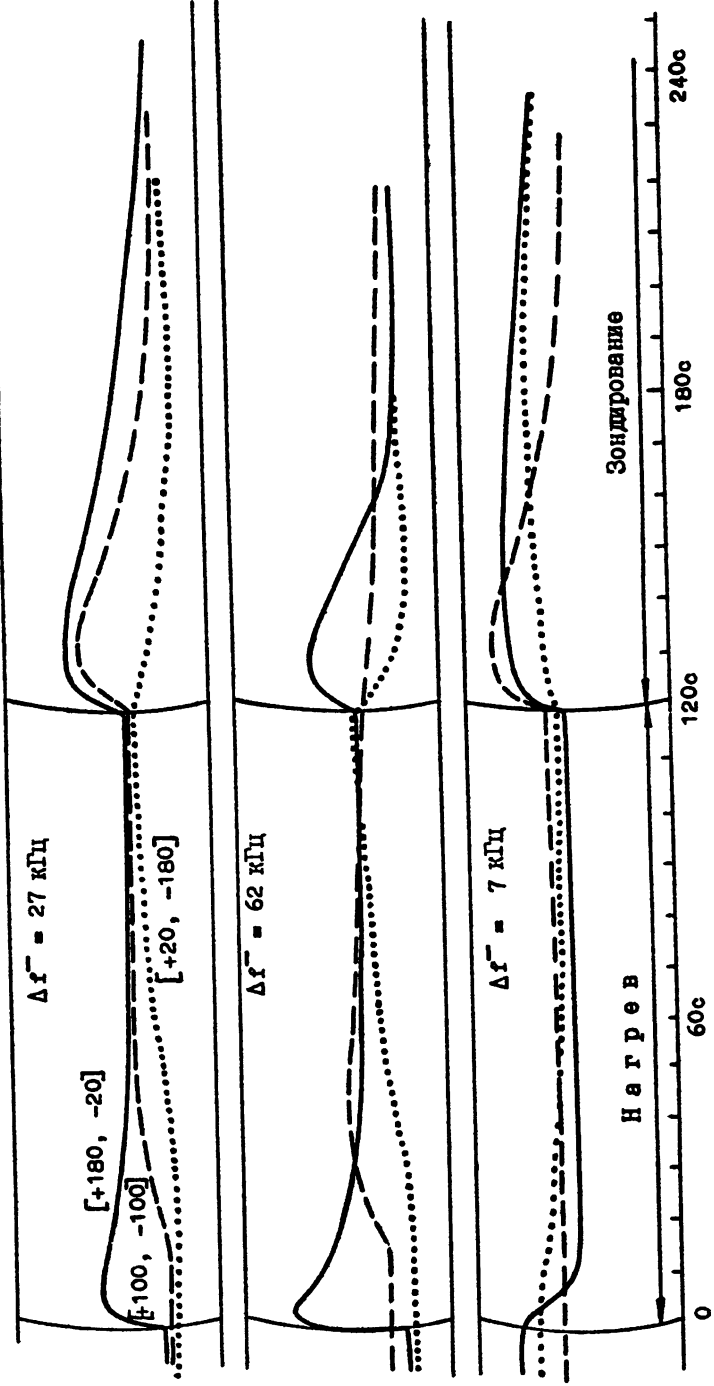
Из рис.5 хорошо видно как с изменением режима воздействия

$f_{\text{ВН}} = 5752 \text{ кГц}$

$T = 19^{\text{h}}50 - 20^{\text{h}}40$

26.09.91

24



Р и с 5



изменяется эволюция излучения во время нагрева и в режиме зонди-  
 рования. В случае квазинепрерывного излучения ВН за время порядка  
 времени развития АО для отстроек  $\Delta f^- = 27$  и  $62$  кГц, отвечающ и х  
 широкополосной компоненте излучения, наблюдается быстрое увеличе-  
 ние амплитуды ИРИ до его максимального уровня. Одновременно имеет  
 место уменьшение амплитуды излучения для отстройки  $-7$  кГц (область  
 узкополосной компоненты). Для этого квазинепрерывного режима наг-  
 рева ионосферной плазмы спустя  $\sim 10$  с после выключения ВН отмеча-  
 ется образование характерного максимума амплитуды ДИРИ. Для режи-  
 ма воздействия  $100$  мс - излучение,  $100$  мс - пауза времена разви-  
 тия ИРИ составляли  $\sim 40$  с (т.е. в отличие от предыдущего случая они  
 увеличились более, чем на порядок, хотя средняя мощность ВН умень-  
 шилась только в два раза) и не наблюдалось формирование максимума  
 его амплитуды. При этом максимум амплитуды ДИРИ сохранялся только  
 для отстроек  $-7$  и  $-27$  кГц и не появлялся на более далекой отстрой-  
 ке  $\Delta f^- = 62$  кГц. Здесь для всех отстроек  $\Delta f^-$  релаксация Д И Р И  
 происходила более быстро чем для режима с квазинепрерывным излу-  
 чением ВН. При нагреве плазмы  $20$  мс импульсами развитие излучения  
 продолжалось в течение всего двухминутного интервала воздействия,  
 после чего сразу наблюдалась стадия релаксации ДИРИ для всех ис-  
 следуемых отстроек. Отсутствие максимума амплитуды ДИРИ, когда не  
 наблюдается развитие эффекта АО на стадии нагрева ионосфер н о й  
 плазмы, является важной его характеристикой и подтверждается на-  
 шими другими многочисленными измерениями /4, 6/. Интересно так же  
 отметить, что хотя характеристики взаимодействия мощного радио -  
 излучения с ионосферной плазмой существенно зависили от реж и м а  
 излучения ВН (об этом, например, можно судить по динамике АО, ИРИ  
 и ДИРИ), стационарный уровень излучения во время нагрева сохра-  
 нялся здесь практически постоянным.

Таким образом, хотя уровень развития ИИГ может оказыва т ь  
 слабое влияние на стационарную интенсивность ИРИ, мы видим, что  
 он в значительной степени определяет динамику ДИРИ. Здесь, по-ви-  
 димому, существует прямая связь между эволюцией ИРИ и динамикой  
 ДИРИ, когда быстрое развитие ИРИ с появлением характерного макси-  
 мума его амплитуды на временах порядка времени развития эффекта  
 АО сопровождается появлением максимума амплитуды ДИРИ после вы-  
 ключения ВН, в то время как отсутствие максимума амплитуды при  
 развитии ИРИ, когда, например, не наблюдается эффект АО на небес-

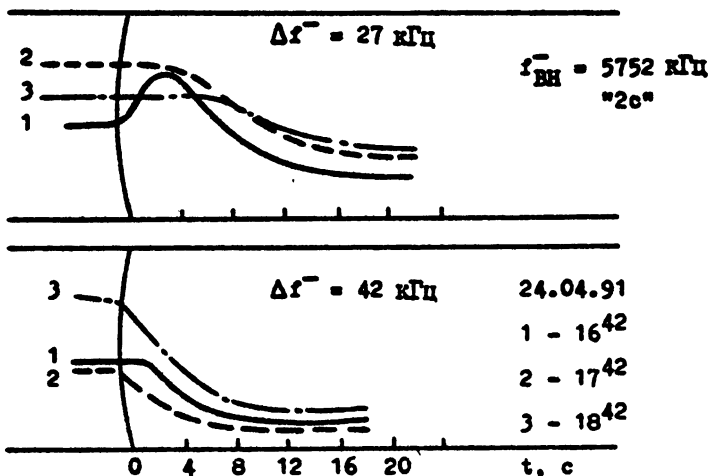
ном сигнале НН, обуславливает, как правило, отсутствие минимума и амплитуды ДИРИ. Казалось бы здесь естественно предположить, что ослабление ИРИ определяется тем же "депрессором", релаксация которого должна вызывать рост амплитуды ДИРИ. Однако такая схема несет в себе существенное противоречие. Суть его заключается в следующем. Согласно проведенным исследованиям свойств ИРИ, рост его амплитуды в области отстроек  $\Delta f^- = 10-60$  мГц определяется генерацией в МИИИ с  $l_{\perp} \approx 3$  м, тогда как возбуждение более крупномасштабных и декаметровых неоднородностей совпадает с периодом уменьшения интенсивности излучения после максимальной фазы его развития и установления его стационарного уровня /5, 8/. Если же мы рассматриваем стадию зондирования ИИГ после выключения НН, то исходя из динамики ДИРИ мы должны заключить, что здесь "источник" определяется декаметровыми неоднородностями, а "депрессор" - неоднородностями с  $l_{\perp} \approx 3-5$  м. Полученное противоречие может быть разрешено только если предположить, что помимо "депрессора", активно действующего непосредственно в области генерации излучения, существует еще второй агент его ослабления, определяющийся, например, аномальным ослаблением выходящего из ВО ионосферы излучения, действие которого распространяется на более широкий высотный интервал, чем область генерации ИРИ. В этом случае "депрессор" для ДИРИ определяется аномальным ослаблением излучения на метровых неоднородностях вне области его генерации, в то время как в самой области генерации эти же неоднородности определяют характеристики "источника" излучения. Поскольку спектральные характеристики МИИИ изменяются как в процессе их развития, так и на стадии их релаксации, завися от ионосферных условий, частоты и мощности НН, то свойства "источника" и "депрессора" также будут изменяться.

Рассмотренная выше схема, объясняющая особенности эволюции и излучения, носит исключительно качественный характер и необходимы дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования, чтобы описать количественно и более полно наблюдаемые явления.

### 3.3. Зависимость динамики ДИРИ от величины отстройки

Эти исследования были выполнены для различных частот НН в диапазоне 4-5,75 МГц. Во всех сеансах наблюдений имело место умень-

величине характерных времен эволюции ДИРИ ( $\tau_{\max}$  и  $\tau_{\text{рел}}$ ) от нескольких десятков секунд до нескольких секунд с ростом величины отстройки излучения  $\Delta f^-$  относительно  $f_{\text{вн}}$  от 7 до 40 кГц.



Р и с.6

Изменение величины отстройки  $\Delta f^-$  приводит к существенно м у изменению формы сигналов ДИРИ. Обратимся к рис.6, где представлены осциллограммы амплитуды излучения для двух отстроек  $\Delta f^- = 27$  и  $42 \text{ кГц}$  в трех последовательных сеансах измерений. Видно, как с ростом  $\Delta f^-$  наблюдается переход от динамики ДИРИ с максимумом (кривая 1) или "плато" (кривые 2 и 3) для отстройки  $\Delta f^- = 27 \text{ кГц}$  к форме излучения с "плато" (кривая 1) или характеризующейся наче дом его релаксации сразу после окончания нагрева (кривые 2 и 3) для отстройки  $\Delta f^- = 42 \text{ кГц}$ . По-видимому, такое соответствие развития ДИРИ на различных отстройках не является случайным и еще р а з указывает на последовательность смены формы его сигналов, рас смотренную нами ранее в разделе 3.1.

### 3.4. Заключительные замечания

Выше мы рассмотрели результаты исследования динамики ДИРИ в

случае, когда  $f_{\text{ВН}} = f_{\text{зона}}$ . Как и для ИРИ /1-6, 16/, характер эволюции ДИРИ показывает свою сильную зависимость от времени суток, значения  $f_{\text{ВН}}$  и ее близость к гармонике гирочастоты электронов, величины отстройки  $\Delta f^-$ , характеристик эффекта АО и уровня развития ИИТ. Важно подчеркнуть, что тенденции изменения характеристик ИРИ и ДИРИ при вариациях указанных параметров в ряде случаев достаточно хорошо совпадают. Это, в первую очередь, относится к появлению максимумов в динамике ИРИ и ДИРИ вместе с появлением быстрого АО на отраженном сигнале ВН, увеличению их контрастности с уменьшением частоты ВН, уменьшению характерных времен этих максимумов амплитуды излучения с увеличением значений отстройки  $\Delta f^-$ , а также наблюдающееся ослабление излучения в обоих случаях с приближением  $f_{\text{ВН}}$  к одной из гармоник гирочастоты электронов. Наряду с этим, выполненные исследования показывают ряд отличительных их особенностей. Наиболее существенной среди них, на наш взгляд, является резкое увеличение характерных времен развития ДИРИ ( $\tau_{\text{пик}}$  и  $\tau_{\text{стаб}}$ ) при переходе от дневных к вечерним часам наблюдений при условии достаточно слабых изменений регулярных характеристик ионосферной плазмы, уровня мощности ВН, характеристик мелкомасштабной ИИТ и ИРИ, регистрируемого в режиме непрерывного воздействия на ионосферную плазму. Предполагается, что это явление связано с усилением в вечерние часы естественного уровня возмущенности плазмы. Если это предположение подтвердится, могут открыться совершенно новые возможности использования искусственного радиоизлучения в качестве достаточно чувствительного метода измерения уровня естественной мелкомасштабной возмущенности F-области ионосферы, которая на средних широтах имеет в обычных (не возмущенных) условиях достаточно слабую интенсивность, и исследование ее характеристик встречает определенные сложности.

Выше мы показали (см. раздел 3.2), что короткие ( $\sim 20$  мс) и достаточно редкие импульсы мощной радиоволны, не вызывая развития эффекта АО, могут приводить к генерации излучения той же пиковой мощности, что и при непрерывном воздействии на ионосферную плазму. Эти измерения также показывают, что наблюдается явно нелинейная зависимость характерных времен развития излучения от уровня средней мощности ВН. В связи с этим встает вопрос о более детальном исследовании свойств ИИТ при импульсном воздействии мощной волной на ионосферную плазму. Проведенные измерения /13, 14/ показывают,

что уже при длительности импульса НН  $\tau_{\text{н}} \sim 10$  мс наблюдается генерация достаточно интенсивных мелкомасштабных неоднородностей, оказывающих влияние на последующий ход развития взаимодействия мощной волны с плазмой. Однако следует отметить, что эти измерения не сопровождалось исследованиями свойств ИРИ и носили эпизодический характер. Поэтому вопрос о влиянии диагностической волны на свойства ИИТ остается в настоящее время в значительной степени не выясненным.

Ясно, что без исследования перечисленных выше проблем нельзя провести строгий анализ особенностей динамики ДИРИ, что, несомненно, в значительной степени сужает возможности его использования в качестве метода диагностики турбулентности ионосферной плазмы.

#### 4. ЗОНДИРОВАНИЕ ВО С ПОМОЩЬЮ ДИРИ

В предыдущих разделах работы мы рассматривали результаты экспериментов, когда частота диагностической волны совпадала с частотой ВН или  $\delta f = f_{\text{зонд}} - f_{\text{вн}} = 0$ . При этом свойства ДИРИ определялись, главным образом, свойствами ИИТ центральной части ВО, возбуждаемой вблизи уровня отражения мощной волны. Идеей экспериментов, рассматриваемых в данной части работы, является локализация ИИТ на различных высотных уровнях ВО при изменении значений  $\delta f$ . Предполагается, что изучение вариаций свойств ДИРИ по ВО позволит сделать некоторые выводы о динамике ИИИИ на различных ее высотах. Отметим, что первые эксперименты по зондированию ВО с помощью ДИРИ были выполнены на стенде "Сура" в 1986 г. /18/.

##### 4.1. Динамика ДИРИ

##### при зондировании различных высот ВО

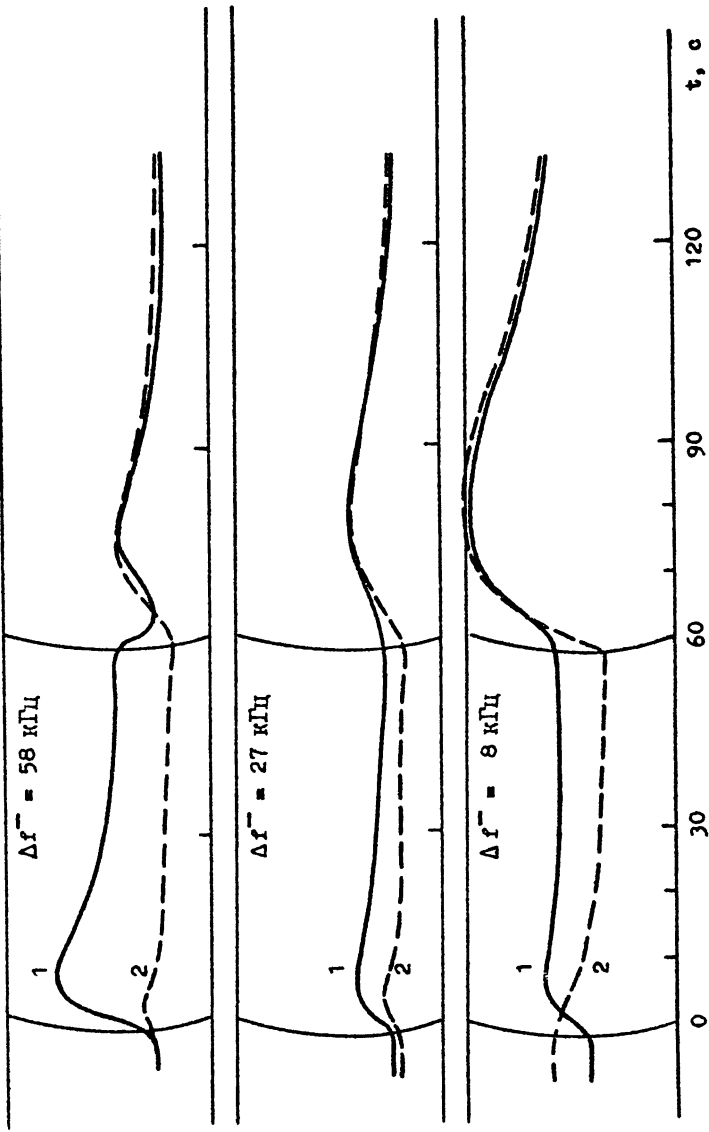
В экспериментах по зондированию ВО с помощью ДИРИ, выполненных в сентябре 1991 г. на нагревном стенде "Сура", была использована схема измерений, когда диагностическая волна излучалась постоянно на частоте  $f_{\text{зонд}} = 5752$  кГц - в диапазоне частот достаточно удаленном от ближайшей гармоники гирочастоты электронов и где наблюдается наиболее мощный и широкий спектр ИРИ в области его отрицательных отстроек. Характеристики ДИРИ регистрировались на трех частотах с отстройками  $\Delta f^- \approx 8, 30$  и  $60$  кГц. Частота ВН изменя-

лась от цикла к циклу нагрева в пределах  $\pm 1$  МГц относительно  $f_{\text{зонд}}$ .

На рис.7 представлены осциллограммы ДИРИ для трех его отстроек в двух сеансах наблюдений, когда частоты ВН были приблизительно на 200 кГц выше (кривые 1) и ниже (кривые 2) частоты зондирования. Это соответствовало уровню отражения зондирующего излучения приблизительно  $\pm 2$  км относительно высот отражения ВН. Обращает на себя внимание практическое совпадение поведения амплитуды ДИРИ на стадии его релаксации после выключения ВН (время излучения мощной волны  $t = 0 \dots 60$  с) за исключением первых трех-пяти секунд, в то время как во время нагрева ионосферной плазмы динамика ДИРИ и уровни стационарного излучения существенно отличались. Считая, что более низкий уровень излучения на стадии нагрева ионосферной плазмы для случая, когда  $f_{\text{ВН}} < f_{\text{зонд}}$  ( $\delta f = f_{\text{зонд}} - f_{\text{ВН}} \approx 200$  кГц), определяется эффектом АО проходящего через ВО ионосферы излучения, по времени релаксации АО  $\sim 3-5$  с, пользуясь данными /7/, можно оценить поперечный масштаб неоднородностей, которые определяют это ослабление:  $l_{\perp} \leq 5-7$  м. Важно, что именно эти неоднородности расположены в узком высотном интервале в центральной части ВО, в то время как более крупные неоднородности локализованы в значительно более широком высотном интервале, достигающем нескольких десятков километров /19/. Здесь мы имеем еще одно подтверждение, что именно релаксация наиболее мелкомасштабных неоднородностей с  $l_{\perp} \leq 5$  м определяет в существенной степени динамику ДИРИ сразу после выключения ВН, а более крупных, дециметровых неоднородностей - свойства ДИРИ на стадии его релаксации.

#### 4.2. Зависимость характеристик ДИРИ от величины расстройки

На рис.8 для отстройки  $\Delta f = 35$  кГц в зависимости от величины расстройки  $\delta f = f_{\text{зонд}} - f_{\text{ВН}}$  приведены результаты измерения интенсивности ДИРИ ( $I$ ), которая достигается к концу минутного интервала нагрева ионосферной плазмы мощным непрерывным радиолучением, его времени развития ( $\tau_{\text{разв}}$ ) после включения ВН, а также времени релаксации амплитуды ДИРИ к ее стационарному уровню ( $\tau_{\text{стац}}$ ) после выключения ВН. Здесь значения  $\delta f < 0$  отвечают т

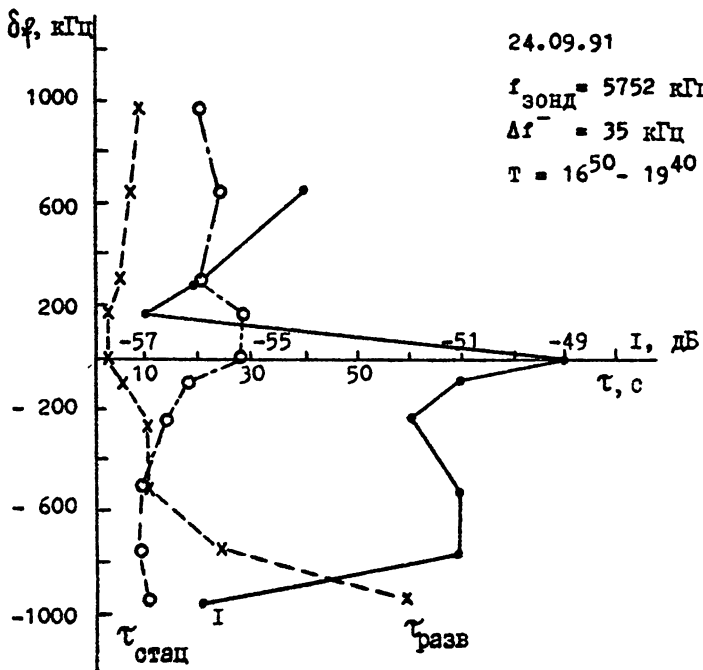


24.09.91

1 -  $f_{BH} = 5980 \text{ kHz}$  ( $T = 21^{\circ}40'$ )

2 -  $f_{BH} = 5570 \text{ kHz}$  ( $T = 21^{\circ}50'$ )

$f_{\text{зонд}} = 5752 \text{ kHz}$



Р и с.8

случае зондирования нижней части ВО, а  $\delta f > 0$  - ее верхняя часть. Видно, что интенсивность ДИРИ I имеет наибольшие значения при зондировании нижней части ВО до уровня отражения ВН. Здесь с уменьшением абсолютных значений расстройки  $\delta f$  наблюдается также уменьшение времен развития ДИРИ  $\tau_{\text{раз}}$  и увеличение характерных времен его релаксации  $\tau_{\text{стац}}$ . В области  $\delta f > 0$  эти характерные времена ДИРИ достаточно слабо зависят от  $\delta f$ , а уровень интенсивности излучения здесь на 4-5 дБ ниже, чем для области  $\delta f < 0$ . Наблюдаемые изменения амплитуды ДИРИ, как и раньше, могут быть интерпретированы как ослабление интенсивности проходящего через ВО излучения за счет его аномального ослабления, а изменение его характерных времен развития и релаксации - как зависимость динамики МИИВ от их местоположения по высоте в ВО ионосферы (см., например, /20/). Следует отметить, что поскольку рассматриваемые



выше измерения проводились, как это теперь ясно, во время перестройки ионосферы от дневных к вечерним условиям ее образования и в (T = I6<sup>50</sup>-I9<sup>40</sup>), полученные экспериментальные результаты, касающиеся времен эволюции ДИРИ, могут быть достаточно сильно искажены за счет влияния их суточных вариаций. Поэтому, представлен на рис. 8 данные носят скорее качественный характер. Тем не менее, полученные результаты, в целом, совпадают с выводами ранее выполненных первых измерений /18/ и показывают, что для получения полного высотного разреза ВО ионосферы при ее зондировании с помощью ДИРИ необходимо проводить измерения в широком диапазоне частот  $\delta f \approx \pm 1$  МГц. При этом свойства излучения, как показали измерения /3/, испытывают сильную зависимость от частоты ВЧ, что так же необходимо принимать во внимание при интерпретации экспериментальных данных. Особенно это относится к областям значений  $f_{\text{вч}}$ , близких к гармоникам гирочастоты электронов и для больших отрицательных отстроек излучения.

Рассмотренные в настоящей работе экспериментальные данные показывают, что одной из основных особенностей динамики ДИРИ на стадии релаксации ИИТ является образование максимума его амплитуды через несколько секунд после выключения ВЧ. Из полученных данных следует, что для больших отрицательных отстроек ( $\Delta f^- = 50+70$  кГц) появление этого максимума наблюдается только при  $\delta f > 0$ , т.е. когда зондирующая волна отражается выше, чем ВЧ. Для меньших отрицательных отстроек  $\Delta f^- = 9$  и 30 кГц максимум амплитуды ДИРИ после выключения ВЧ обнаруживался и при зондировании существенно более низких высот ВО, начиная с расстройек  $\delta f^- \approx 750$  кГц. Отсюда ясно, что одни и те же неоднородности могут оказывать различное влияние на характеристики ДИРИ в зависимости от величины его отстройки  $\Delta f^-$ . Отмечается, что максимум ДИРИ для всех отстроек  $\Delta f^-$  был наиболее ярко выражен (т.е. имел наибольшую контрастность по сравнению со стационарным значением амплитуды ДИРИ во время нагрева ионосферной плазмы) при расстройках  $\delta f \approx 300$  кГц, или когда зондирующая волна проходила через всю центральную часть ВО, занятую наиболее мелкомасштабными ( $l_{\perp} \leq 10$  м) неоднородностями. Последнее в очередной раз указывает, что именно эти неоднородности оказывают определяющее влияние на формирование максимума ДИРИ. В области  $\delta f > 300$  кГц контрастность максимума амплитуды ДИРИ уменьшается с ростом  $\delta f$ , но более мед-

ленно, чем в области  $\Delta f < 300$  кГц. Также отмечается, что для каждой выбранной величины отстройки  $\Delta f$  — время достижения максимума амплитуды ДИРИ слабо изменялось с изменением величины отстройки  $\delta f$ .

Рассмотренные выше экспериментальные данные дают несомненно новую информацию о свойствах ДИРИ. В частности, еще раз убедительно продемонстрировано, что именно наиболее мелкомасштабная часть МИИН с  $l_{\perp} \leq 5$  м играет определяющую роль в формировании максимума интенсивности ДИРИ после выключения ВН, и что аномальное ослабление радиоволн в ВО ионосферы в значительной степени определяет интенсивность излучения и его динамику. Эти эксперименты также продемонстрировали возможность локализации ИИТ на различных высотах ВО, что открывает новые перспективы для ее исследования. В то же время становятся очевидными сложности на этом пути. Основная из них — необходимость зондирования ВО ионосферы в очень широком (порядка нескольких мегагерц) диапазоне частот. При этом, несомненно, будет иметь место существенное изменение как характеристик ионосферной плазмы, так и свойств ИРИ, особенно в диапазонах частот, близких к гармоникам гирорезонанса. Последнее в некоторых случаях делает невозможным прямое сопоставление полученных результатов, что сильно сужает возможности данного метода для исследования свойств ИИТ.

Представленные выше экспериментальные данные являются результатом лишь первых наших усилий по использованию ДИРИ как метода диагностики ИИТ, возбуждаемой мощной радиоволной в F-области ионосферы. Многие вопросы здесь остаются еще открытыми и необходимы дальнейшие целенаправленные эксперименты для их решения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ экспериментальных данных позволил установить основные закономерности эволюции ДИРИ, определить наиболее оптимальные режимы излучения диагностической волны и выявить существующие ограничения метода исследования ИИТ с помощью ДИРИ. Хотя эти измерения еще раз убедительно показали, что динамика как ИРИ, так и ДИРИ определяется развитием и релаксацией МИИН и особенно их мелкомасштабной частью с  $l_{\perp} \leq 5$  м, до сих пор, однако, остается вопросом, почему неоднородности одного и того же масшта-

ба в одном случае определяют свойства "источника", поддерживающего генерацию излучения, а в другом - выступают в роли его "депрессора". Кроме того, в настоящее время остается также неясным, каким образом уровень развития ИИГ определяет динамику ДИРИ. Рассмотренные в настоящей работе данные являются результатом лишь первых наших экспериментов, выполненных в данном направлении. Однако представляется, что полученная здесь информация имеет важное значение для выяснения физических процессов, лежащих в основе генерации искусственного радиоизлучения. По-видимому, свойства излучения в значительной степени определяются спектральными характеристиками МИИИ, которые в данном процессе играют тройную роль. На первом этапе взаимодействия мощного радиоизлучения с плазмой они участвуют в его трансформации в плазменные волны; на втором этапе определяют обратную трансформацию спектра плазменных волн во вторичное электромагнитное излучение (ИРИ); наконец, они определяют аномальное ослабление выходящего из возмущенной области ионосферы этого вторичного излучения. В этой связи важное значение приобретает исследование характеристик ДИРИ при небольших отрицательных ( $\Delta f^- \approx 7$  кГц) и положительных отстройках излучения. Предполагается, что эти компоненты излучения генерируются до стадии развития МИИИ вблизи уровня отражения ВН. Поэтому полученные в этих измерениях экспериментальные данные могли бы служить как важным дополнением к измерениям при  $|\Delta f^-| \approx 10-50$  кГц, так и представлять самостоятельный интерес. Однако из-за близости частоты излучения к частоте ВН проведение таких измерений представляет достаточно сложную техническую задачу.

Следующим важным, по нашему мнению, вопросом является исследование влияния естественной возмущенности ионосферной плазмы на характеристики ДИРИ. Здесь необходимо проведение более тщательных измерений в течение суток вариаций эволюции излучения при изменении режима зондирования. Если сделанные в работе предположения подтвердятся, зондирование ионосферной плазмы с помощью ДИРИ может явиться новым методом по локации естественных метровых и декаметровых неоднородностей в среднеширотной ионосфере, обладающим достаточно высокой чувствительностью.

Авторы считают своим приятным долгом выразить признательность всем сотрудникам нагревных стендов "Гиссар", "Зименки" и "Сура" за помощь в организации и проведении экспериментов.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

- I. Stubbe P., Kopka H., Thide B., Derblom H. // J. Geophys Res. - 1984. - V.89, Na A9. - P.7523-7536.
2. Leyser T.B., Thide B. et al // J. Geophys. Res. - 1990. - V.95, Na A10. - P.17233-17244.
3. Leyser T.B. et al // Submitted to J. Geophys. Res. - 1993.
4. Ерухимов Л.М., Фролов В.Л. Динамические и спектральные характеристики искусственного радиоизлучения ионосферной плазмы//Препринт № 185. - Горький: НИРФИ, 1984.
5. Сергеев Е.Н., Фролов В.Л. О структуре искусственного радиоизлучения ионосферной плазмы на частотах ниже частоты волны накачки//Препринт № 324. - Н.Новгород: НИРФИ, 1991.
6. Бойко Г.Н. и др.//Изв.вузов. - Радиофизика. - 1985. - Т.28, № 4. - С.395-405.
7. Ерухимов Л.М. и др.//Изв.вузов. - Радиофизика. - 1987. - Т.30, № 2. - С.208-225.
8. Фролов В.Л.//Труды III Суздальского симпозиума УРСИ по модификации ионосферы. - М., 1991. - С.158-159.
9. Грач С.М.//Изв.вузов. - Радиофизика. - 1985. - Т.28, № 6. - С.684-693.
10. Ерухимов Л.М., Метелев С.А., Рязумов Д.В.//Изв.вузов. - Радиофизика. - 1988. - Т.31, № II. - С.1301-1308.
11. Сергеев Е.Н., Фролов В.Л.//Труды III Суздальского симпозиума УРСИ по модификации ионосферы. - М., 1991. - С.154-155.
12. Белов И.Ф. и др. Экспериментальный комплекс "Сура" для исследования искусственных возмущений ионосферы//Препринт № 167. - Горький: НИРФИ, 1983.
13. Ерухимов Л.М., Фролов В.Л. Результаты экспериментальных исследований свойств искусственной ионосферной турбулентности на начальной стадии взаимодействия мощного радиоизлучения с плазмой F-слоя ионосферы//Препринт № 284. - Горький: НИРФИ, 1989.
14. Бойко Г.Н., Ерухимов Л.М., Фролов В.Л.//Геомagnetизм и аэрoнoмия. - 1990. - Т.30, № 6. - С.998-1002.
15. Ерухимов Л.М., Метелев С.А., Митяков Н.А., Фролов В.Л.//Изв. вузов. - Радиофизика. - 1978. - Т.21, № 12. - С.1738-1741.

16. Ерухимов Л.М. и др. Результаты экспериментальных исследований искусственной моноосферной турбулентности, полученные на нагревом стенде "Гиссар"//Препринт № 290. - Горький: НИРФИ, 1989.
17. Фролов В.Л.//Изв.вузов. - Радиофизика. - 1988. - Т.31, № 10. - С.1164-1168.
18. Бойко Г.Н., Ерухимов Л.М., Эззин В.А., Метелев С.А.//Тезисы докладов на XV Всесоюзной конференции по распространению радиоволн. - М.: Наука, 1987. - С.103.
19. Fialer P.A.//Radio Sci. - 1974. - V.9, N.11. - P.923-940.
20. Ерухимов Л.М. и др.//Изв.вузов. - Радиофизика. - 1982. - Т.25, № 11. - С.1360-1362.

Дата поступления статьи  
28 июля 1993 г.

# О Г Л А В Л Е Н И Е

	стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. СХЕМА ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ.....	4
2. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ.....	7
2.1. Спектральные характеристики ИРИ и ДИРИ.....	7
2.2. Зависимость свойств ДИРИ от длительности зондирующего импульса.....	8
2.3. Зависимость характеристик ДИРИ от мощности зондирующего импульса.....	12
2.4. Характер эволюции ИРИ на начальном этапе взаимодействия ВН с плазмой в условиях развитой ионосферной турбулентности.....	13
2.5. Выбор параметров диагностической волны.....	14
3. ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ДИРИ.....	15
3.1. Суточная зависимость свойств ДИРИ.....	15
3.2. Зависимость характеристик ДИРИ от уровня развития ИИГ.....	23
3.3. Зависимость динамики ДИРИ от величины отстройки .....	26
3.4. Заключительные замечания.....	27
4. ЗОНДИРОВАНИЕ ВО С ПОМОЩЬЮ ДИРИ.....	29
4.1. Динамика ДИРИ при зондировании различных высот ВО.....	29
4.2. Зависимость характеристик ДИРИ от величины расстройки .....	30
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	34
ЛИТЕРАТУРА.....	36