

Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР  
Горьковский ордена Трудового Красного Знамени  
научно-исследовательский радиофизический институт (НИРФИ)

Преприят № 189

ИССЛЕДОВАНИЯ КРУПНОМАСШТАБНОЙ ОБЛАСТИ ВОЗМУЩЕНИЯ,  
ВОЗНИКАЮЩЕЙ ПРИ ВЕРТИКАЛЬНОМ НАГРЕВЕ ИОНОСФЕРЫ  
МОЩНЫМ КВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ  
И ЕЁ ВЛИЯНИЯ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

ЧАСТЬ II

Н. В. Бахметьева  
Е. А. Бенедиктов  
Д. А. Игнатьев  
С. Н. Матюгин  
П. Б. Шавин

Горький 1985

УДК 551.510.535

В работе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований крупномасштабной области возмущения, возникающей при вертикальном нагреве ионосферы мощным коротковолновым радиоизлучением. Определены такие параметры искусственной ОВ, как горизонтальные и вертикальные размеры, величина относительных изменений электронной концентрации. Исследовано влияние ОВ на характеристики пробных волн на трассах различной протяжённости.

## ВВЕДЕНИЕ

Вторая часть работы посвящена экспериментальному исследованию параметров крупномасштабной искусственной области возмущения, средне-масштабных ( $100 \text{ м} \leq l_1 \leq 1 \text{ км}$ ) неоднородностей электронной концентрации и их влияния на характеристики пробных радиоволн.

В первой главе определяется относительное изменение электронной концентрации в центре ОВ и оцениваются её вертикальные размеры на основе экспериментов вертикального (ВЗ) и наклонного (НЗ) зондирования.

Во второй главе основное внимание уделено параметрам среднemasштабных неоднородностей, определены вертикальные и горизонтальные размеры области, занятой такими неоднородностями.

В третьей главе приводятся первые экспериментальные данные об изменении дистанционно-частотных характеристик сигналов наклонного зондирования при воздействии на ионосферу мощным КВ радиоизлучением.

В четвертой главе рассмотрены вопросы влияния ОВ и её неоднородной структуры на амплитудные характеристики пробных радиоволн.

В пятой главе приводятся экспериментальные данные по определению относительного изменения электронной концентрации в E-слое ионосферы.

В таблице перечислены основные эксперименты по нагреву F- и E-слоев ионосферы, приведены характеристики трасс, параметры нагревных стендов ( $f_0$  - частота нагрева,  $P_3$  - эквивалентная мощность излучения), частота пробной волны ( $f_{\text{п}}$ ), полученные экспериментальные результаты.

№	Период п/п: наблюдений:	Метод измерения: атмосферики:	Д, км	f в МГц		р, мВг:	f <sub>п</sub> , МГц:	Полученный результат:	Примечание
				з	к				
1.	9-24 час март 1978	H3	2900	4,6 "0" 5,75 "0"	15 20	19	Уменьшение амплитуды пробного сигнала при нагреве F-слоя	Трасса проходила по краю OB	
2.	10-14 час март 1980	H3	100	7,8 "0" 4,6 "0"	8 15	6-9	Уменьшение амплитуды пробного сигнала при нагреве F-слоя	Трасса проходила по краям OB с ( $\Delta N_e / N_{e0} \approx 1,5 \cdot 10^{-2}$ / $\Delta N_e / N_{e0} \approx 1 \cdot 10^{-1}$ )	
3.	9-24 час март-июнь 1980	H3	3100	5,75 "0"	20	17-21	Увеличение амплитуды пробного сигнала при нагреве F-слоя	Трасса проходила вблизи центра OB	
4.	17-23 час июнь 1981	H3	200-260	5,8 "0" 5,4 "0"	50 20	6-8	Увеличение амплитуды пробного сигнала при нагреве F-слоя. Развитие СМН	$\Delta N_e / N_{e0} \approx 1,3 \cdot 10^{-1}$ $L_h > 15-30$ км, $40 \leq L_f \leq 70$ км. Для неоднородного слоя: $L_h \approx 6-10$ км, $\Delta N_e / N_{e0} \approx (1-5) \cdot 10^{-3}$ $L_f \approx 60 + 600$ м	
5.	14-21 час май 1982	B3	0; 26	5,75 "0" и "X"	20	6-7	Увеличение амплитуды пробного сигнала при нагреве F-слоя	$\Delta N_e / N_{e0} \approx 5 \cdot 10^{-2}$ $L_h \approx 15 - 20$ км	
6.	17-21 час октябрь 1982	H3	1100	5,8 "0"	50	1,2-21,2	Увеличение МПЧ-трассы при нагреве F-слоя		
7.	13-14 час февраль-март 1983	H3	3100-3300	5,7 "0"	50	19-20	Увеличение и уменьшение в зависимости от ориентации трассы, амплитуды пробного сигнала при нагреве F-слоя		
8.	11-13 час сентябрь 1979	B3	0	4,6 "0"	15	3,55	Увеличение действующей высоты пробного сигнала при нагреве E-слоя	$\Delta N_e / N_{e0} \approx (1-2,5) \cdot 10^{-2}$	
9.	14-16 час май 1982	B3	0	5,75 "0" и "X"	20	6-8	Изменение доплеровского смещения частоты пробного сигнала при нагреве E-слоя	$\Delta N_e / N_{e0} \approx 5 \cdot 10^{-2}$	

# 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИСКУССТВЕННОЙ ОБЛАСТИ ВОЗМУЩЕНИЯ F-СЛОЯ ИОНОСФЕРЫ

Эксперименты по исследованию параметров ОБ проводились в НИРФИ с 1980 по 1982 г. Их целью являлось определение размеров и относительного изменения электронной концентрации искусственной области возмущения, образующейся при нагреве ионосферы полем мощных радиоволн. В первой серии экспериментов (март 1980 г.) для создания ОБ использовались два мощных передатчика: П1, работающий на частоте 7,8 МГц с эквивалентной мощностью  $P_{\text{э}} = P \times G \approx 8$  МВт и передатчик П2 - на частоте 4,6 МГц с  $P_{\text{э}} = 15$  МВт. Расстояние между пунктами, в которых были расположены передатчики, составляло по линии восток - запад около 100 км. Передатчики включались одновременно на 10 минут в непрерывном режиме, после этого П2 выключался, а П1 переводился в режим пробных волн. В приёмном пункте, расположенном на этой же линии, осуществлялся приём сигналов П1. Длина этой трассы составляла 120 км. Анализу было подвергнуто 15 сеансов работы передатчиков за 26 и 28 марта 1980 г. В 13 из них было обнаружено изменение амплитуды сигнала, коррелирующее с работой мощных передатчиков. В процессе обработки для сглаживания быстрых флуктуаций было проведено усреднение амплитуд сигналов за каждую минуту, а затем, после нормировки на последнюю минуту паузы, проведено усреднение по всем 13 сеансам. Результирующая кривая временного хода нормированной амплитуды  $A_{\text{норм.}}(t)$  сигнала П1 приведена на рис. 2.1.1. Из рисунка видно, что при нагреве амплитуда уменьшалась в среднем на 30-40%. После выключения П2 амплитуда постепенно возрастала до первоначального уровня и времена развития и релаксации эффекта составляли примерно 10 мин.

Уменьшение амплитуды сигнала при прохождении ОБ, как известно, может быть связано с рассеянием пробных радиоволн на мелко- и среднemasштабных искусственных неоднородностях электронной концентрации. Однако в данном эксперименте, как показывают траекторные расчеты, луч проходил по краям возмущённых областей, где образование неоднородностей при указанных выше потенциалах нагревных передатчиков маловероятно. К уменьшению амплитуд пробных волн, по всей видимости, приводил "линзовый" эффект, на что указывают довольно большие времена развития и релаксации<sup>\*)</sup>.

\*) Согласно [2], характерные времена образования и релаксации искусственной крупномасштабной неоднородности достигают 10-15 минут.

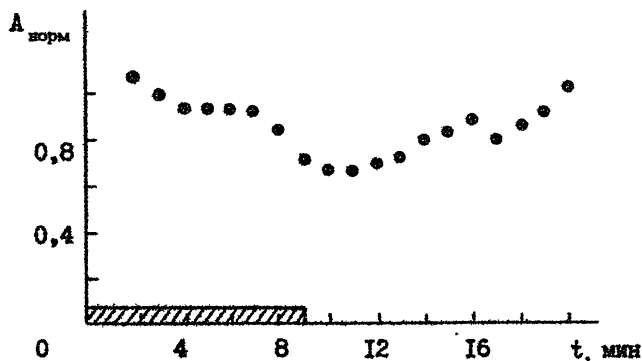


Рис. 2.1.1

Для оценок влияния ОБ, создаваемой П1, имеем  $f = 7,8$  МГц,  $f_0 = f \cos \alpha$ ,  $\alpha \approx 12^\circ$ ,  $l = 20$  км,  $\xi = 60$  км,  $L_1 = L_2 = 280$  км, при  $\Delta N_e / N_{e0} = 1,5 \cdot 10^{-2}$  из (1.2.3) получаем ожидаемую величину уменьшения амплитуды на 30%. Для П2:  $f = 7,8$  МГц,  $f_0 = 4,6$  МГц,  $l = 15$  км,  $\xi = 20$  км,  $L_1 = 310$  км,  $L_2 = 250$  км и при  $\Delta N_e / N_{e0} \approx 1 \cdot 10^{-1}$  аналогично получаем уменьшение  $A$  на 20%. Следовательно, суммарное воздействие двух ОБ может приводить к уменьшению амплитуды сигнала примерно на 40%, что согласуется с экспериментальными данными (см. рис. 2.1.1).

В июне 1981 г. были проведены экспериментальные работы на специально оборудованных коротких трассах наклонного зондирования (см. рис. 2.1.2). В пункте П1 (П2) одновременно излучались две пробные частоты  $f_{n1} = 7,5$  (6,5) МГц и  $f_{n2} = 5,65$  МГц импульсами длительностью 100 мкс и частотой повторения 10 Гц. В качестве нагревного использовался

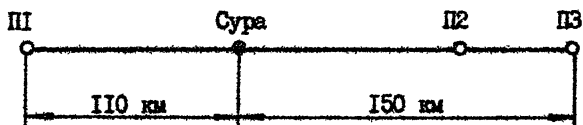


Рис. 2.1.2

стенд "Сура" [1], работавший 10-минутными циклами на частоте  $f_0 = 5,828 (5,455)$  МГц с  $P_0 = P \times G \approx 50 (20)$  МВт. Приём пробных волн (ПВ) осуществлялся сначала в П2 ( $D = 264$  км, угол трассы с геомагнитным полем  $\varphi_M = 79^\circ$ ), затем в П3 ( $D = 206$  км,  $\varphi_M = 79^\circ$ ) с помощью специализированной аппаратуры, позволяющей измерять амплитуды сигналов с разными задержками.

Анализ экспериментальных данных показал, что примерно в 30% циклов работы "Суры" наблюдались характерные изменения амплитуды ПВ (см. рис. 2.1.3). Из рисунка видно, что в течение первых трёх минут амплитуда пробных волн падает, что связано с рассеянием на среднemasштабных неоднородностях электронной концентрации в ОВ. На это указывает и увеличение частоты флуктуаций амплитуды сигнала при включении ВП и увеличение частоты флуктуаций амплитуды сигнала при включении ВП и постепенно спадает до первоначального уровня. Увеличение амплитуды во время работы связано с проявлением фокусирующих свойств ОВ, т. к. сигналы ПВ проходили через область фокусировки. После выключения ВП релаксируют среднemasштабные неоднородности (за время около минуты),

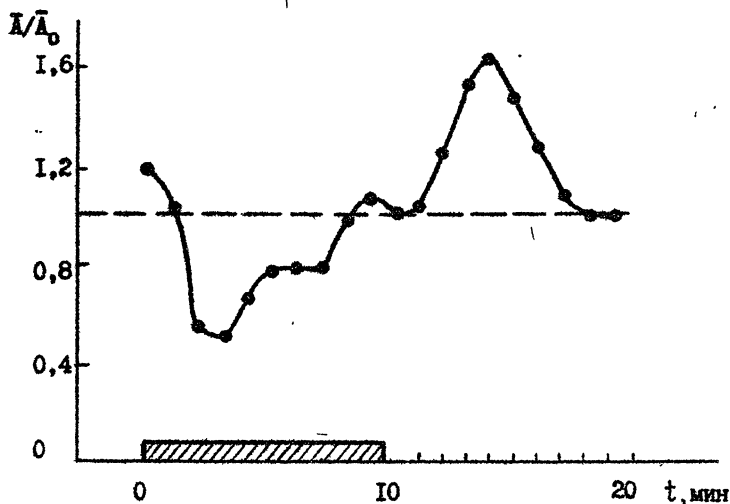


Рис. 2.1.3

и ОВ ещё сохраняет свои фокусирующие свойства примерно в течение 8 минут. Отличие в поведении амплитуд (см. рис. 2.1.1. и рис. 2.1.3 ) связано с тем, что (как уже отмечалось) в первом случае луч проходил по краям ОВ, где нет искусственных неоднородностей, и в зоне дефокусировки.

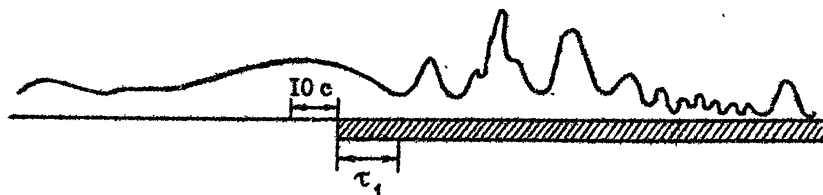


Рис. 2.1.4

Проводя аналогичные рассмотренным выше оценки, можно показать, что обеспечить указанное изменение амплитуды ПВ могло относительное отклонение электронной концентрации  $\Delta N_e / N_{ce}$  в центре ОВ примерно на 13%.

Эксперименты по исследованию параметров ОВ F-слоя ионосферы были продолжены в мае 1982 г. в период с 14.00 до 21.00 МДВ. Возмущение ионосферной плазмы осуществлялось полем радиоволн излучаемых передатчиком с эквивалентной мощностью  $P_3 = P \times G = 20$  МВт в режиме несущей на частоте  $f_0 = 5,75$  МГц. Длительность работы ВП составляла 7 минут, а паузы – 8 минут. В отдельные дни излучалась как обыкновенная, так и необыкновенная компоненты. Передатчик пробных волн (ППВ) находился рядом с ВП и работал в импульсном режиме с  $\tau_{\text{и}} = 100$  мкс и  $f_{\text{повт}} = 100$  Гц в диапазоне 6–7 МГц. Пробные радиоволны регистрировались одновременно в двух пунктах: один из них (П1) находился вблизи передатчиков, второй (П2) отнесен на 25 км в северо-западном направлении от первого. При обработке экспериментальных данных проводилось усреднение амплитуд отраженных от F-слоя ионосферы сигналов за каждую минуту, а затем сглаживание по трём точкам. Все реализации пауза – нагрев – пауза нормировались на значение амплитуды  $A_0$  в последнюю минуту паузы перед включением ВП. Кроме того, для уменьшения амплитудных вариаций, не коррелировавших с периодом работы ВП, применялся метод усреднения по нескольким реализациям [3].

Анализ полученных данных выявил в значительном числе сеансов в обоих пунктах характерное изменение амплитуд пробных радиоволн, кор-



релирующихся с работой ВП. На рис. 2.1.5 приведен пример усредненного по трём ( $n = 3$ ) последовательным сеансам нагрева хода нормированных амплитуд  $A/A_0$  сигналов на частоте  $f_n = 6,05$  МГц в пункте П1 за 12.05.1982 г. Возмущение F-слоя ионосферы осуществлялось мощной радиоволной обыкновенной поляризации на частоте  $f_0 = 5,75$  МГц. Период нагрева отмечен на рис. 2.1.5 штриховкой. Видно, что в первые минуты после включения ВП амплитуда пробных сигналов уменьшилась. Затем наблюдалось её увеличение; далее, достигнув максимального значения через 3 минуты после выключения ВП, амплитуда в течение 4 минут плавно восстанавливалась до первоначального уровня.

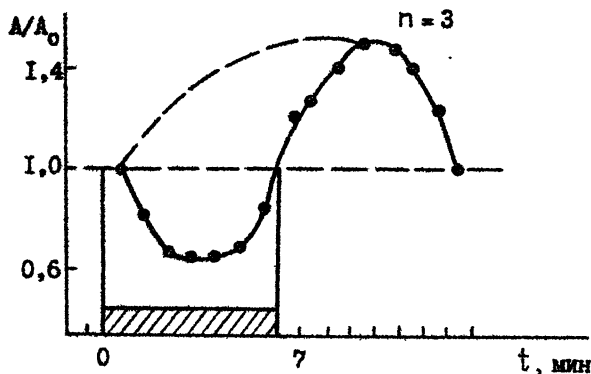


Рис. 2.1.5

Характерные изменения  $A/A_0$  во времени на рис. 2.1.5 обусловлены, по-видимому, влиянием на распространение радиоволн неоднородностей различных масштабов, образующихся в ОВ. Пунктирными линиями приведено качественно ожидаемое увеличение амплитуд пробных волн вследствие фокусирующих свойств крупномасштабной ОВ. Эксперименты [4] по исследованию фокусирующих свойств ОВ на однокачковой трассе при  $f_n = 17$  МГц ( $f_n \gg f_0$ ) показали именно монотонное увеличение амплитуды пробных сигналов с характерным временем около 5 минут.

Факторами, приводящими к ослаблению амплитуд пробных волн в первые минуты после включения ВП, могут быть рассеяние радиоволн на искусственных мелкомасштабных [5] и среднемасштабных [6] неоднородностях  $N_e$  в ОВ, поглощение в нижней ионосфере и дефокусировка радио-

волн в искусственно возмущенном E-слое ионосферы. Так, довольно резкое ослабление амплитуды в первую минуту на рис. 2.1.5, вероятно, связано с известным эффектом рассеяния пробных радиоволн на искусственных мелкомасштабных неоднородностях (поперечные по отношению к геомагнитному полю размеры  $l_1 \leq 20 + 50$  м) [5]. Кроме того, нельзя исключать возможного влияния дополнительного поглощения и дефокусировки пробных радиоволн возмущенной E-областью ионосферы. В этом случае характерное время ослабления амплитуд определяется увеличением  $\gamma_{\text{эфф}}$  (за время  $\sim 20$  мс) и ростом  $N_e$  в E-слое за 20-50 с из-за изменения при нагреве плазмы коэффициента диссоциативной рекомбинации  $\alpha$  атмосферных ионов  $\text{NO}^+$  и  $\text{O}_2^+$  [7]. Необходимо отметить, однако, что если бы этот эффект был определяющим, то аналогичное изменение  $A/A_0$  должно было бы проявляться и при работе ВП на необыкновенной волне (см. ниже).

Следовательно, можно полагать, что основным фактором, влияющим в первые минуты работы ВП на амплитуду ПВ, может быть рассеяние на среднимасштабных неоднородностях  $N_e$  в F-слое ионосферы. На это указывает и увеличение частоты флуктуаций амплитуды пробного сигнала в первые минуты нагрева. Далее, по мере развития ОВ, увеличение амплитуды пробных волн можно объяснить проявлением фокусирующих свойств крупномасштабной ОВ. Причём, максимальной величины этот эффект достигает через 2-3 минуты после выключения ВП, когда релаксируют среднимасштабные неоднородности.

Несомненный интерес представляет сопоставление эффектов, возникающих при воздействии на ионосферу мощными радиоволнами обыкновенной и необыкновенной поляризации. На рис. 2.1.6 приведены первые экспериментальные данные, полученные 12.05.1982 г. при одновременных наблюдениях в П1 (рис. 2.1.6а) и П2 (рис. 2.1.6б). Каждая кривая получена усреднением по трём ( $n = 3$ ) последовательным сеансам нагрева F-слоя обыкновенной (кружки) волной в период с 19 ч 00 мин по 19 ч 45 мин и необыкновенной (крестики) с 18 ч 16 мин по 19 ч 00 мин. Длительность сеансов работы ВП составляла 7 мин, паузы - 8 мин. Эффект резкого уменьшения амплитуды сигнала в первые 20-40 с, наблюдавшийся только при работе ВП на обыкновенной компоненте, исключался. Из рис. 2.1.6 видно, что в обоих пунктах максимумы амплитуд пробных сигналов наблюдались по времени раньше при работе ВП на необыкновенной волне. В П2 наблюдалось некоторое запаздывание обоих максимумов относительно П1. Это запаздывание было примерно одинаково при работе ВП как на

обыкновенной, так и на необыкновенной волнах и составляло около 2 мин.

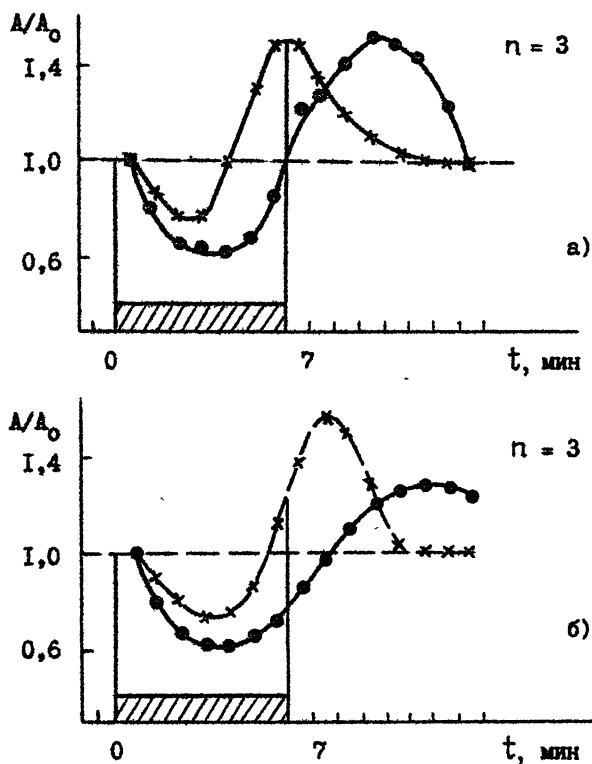


Рис. 2.1.6

Подобие кривых подтверждает имеющиеся представления о крупномасштабной области возмущения как об ионосферной линзе. Согласно оценкам, фокусное расстояние линзы в эксперименте превышало расстояние от линзы до поверхности Земли ( $\sim 250$  км). В этом случае увеличение амплитуд пробных сигналов должно наблюдаться в некоторой области на поверхности Земли, диаметр которой, по оценкам, составлял бы около 70 км. Именно такой эффект и наблюдался в пунктах П1 и П2, разнесенных на 25 км. Не исключено, что запаздывание максимума  $A(t)$  в П2

может быть связано с ветровым сносом неоднородностей из центра области возмущения.

Максимальная величина амплитуды пробного сигнала после выключения ВП примерно в 1,5 раза превышала её невозмущенное значение. Следует отметить, что при работе ВП на необыкновенной компоненте не наблюдалось резкого уменьшения амплитуды пробного сигнала в течение первой минуты, а плавное уменьшение амплитуды в первые три минуты работы ВП на необыкновенной компоненте было несколько меньше, чем при его работе на обыкновенной. Это подтверждает теоретические выводы о том, что при возмущении ионосферы мощным радиовозлучением на необыкновенной волне не происходит генерации мелкомасштабных неоднородностей  $N_g$  [6] и самофокусирующая неустойчивость (ответственная за генерацию среднемасштабных неоднородностей  $N_e$ ) интенсивнее развивается при обыкновенной поляризации мощной радиоволны [8].

Исходя из (1.2.3), увеличение амплитуды пробного сигнала в 1,5 раза можно объяснить максимальным относительным изменением в центре ОВ  $\Delta N_e / N_{e0} \approx 5 \cdot 10^{-2}$ . Эта оценка хорошо согласуется с экспериментальными данными [9] и с теоретическими оценками [6].

Исходя из характерных времен развития и релаксации крупномасштабной ОВ  $t \approx 7 + 8$  мин, можно оценить её вертикальные размеры  $L_g$ :

$$L_g^2 \approx D_{a||} t, \quad 2.1.1$$

где  $D_{a||}$  - коэффициент продольной амбиполярной диффузии. Из (2.1.1) можно получить  $L_g \approx 15 - 20$  км.

Таким образом, если взять  $D_{a||} = 6 \cdot 10^9$  см<sup>2</sup>/с [2], то на основе изложенных выше экспериментальных результатов можно сделать вывод, что при нагреве F-слоя ионосферы за время 7-8 мин формируется крупномасштабная ОВ с  $\Delta N_e / N_{e0} \approx 5 \cdot 10^{-2}$  при эквивалентной мощности ВП  $PG \approx 20$  МВт и с  $\Delta N_e / N_{e0} \approx 1,3 \cdot 10^{-1}$  при  $PG \approx 50$  МВт. Такая ОВ обладает фокусирующими свойствами.

## 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ СРЕДНЕСИТАБНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ В ОВ

В эксперименте по НЗ (июнь 1981 г.) отчетливо проявлялся эффект искусственных мерцаний. Для оценки параметров неоднородностей определялись времена развития ( $\tau_1$ ) и релаксации ( $\tau_2$ ) искусствен-

ных мерцаний, а также значения временного интервала корреляции ( $\tau_k$ ) мерцаний в периоды нагрева и паузы. Значение  $\tau_k'$  определялось на уровне  $e^{-1}$ , исходя из расчетных значений нормированного коэффициента корреляции  $\rho(\tau)$ . Помимо  $\rho(\tau)$ , рассматривались отдельно для нагрева и паузы среднее значение амплитуды сигнала  $\langle A \rangle$ , дисперсия  $\sigma_A^2$ , коэффициент вариации  $\nu = \sigma_A / \langle A \rangle$ , индекс флуктуации интенсивности  $F = (\langle J^2 \rangle - \langle J \rangle^2) / \langle J \rangle^2$ , плотность вероятности амплитуд  $W(A)$ , спектральная плотность мощности  $S(\nu)$ . Интервал усреднения составлял 2-10 минут и выбирался с учетом времени установления характеристик, стационарности и малости статистической погрешности. Первичными данными являлись значения амплитуд сигналов, снятых через 1 с. Для интерпретации ряда результатов на ЭВМ рассчитывались траектории лучей в магнито-активной плазме.

## 2.1. Поперечные масштабы

Геометрия трасс наклонного зондирования была такова, что, определяя величину  $\tau_k$ , можно было оценить [10] значение  $l_{\perp} = \tau_k V$  масштаба искусственных неоднородностей поперек геомагнитного поля ( $V$  - скорость дрейфа неоднородностей). На рис. 2.2.1 представлена гистограмма значений  $\tau_k$ , полученных в эксперименте. Видно, что величина  $\tau_k$  при нагреве изменялась, в основном, от 1 до 5 с со средним значением около 3 с. Полагая, что для условий эксперимента  $V = 60 - 100$  м/с (см. [11]), получаем, что поперечные масштабы неоднородностей составляли  $l_{\perp} = 60 - 600$  м со средним значением  $\langle l_{\perp} \rangle \approx 180 - 300$  м. Таким образом, эффект искусственных мерцаний был обусловлен рассеянием радиоволн на среднемасштабных искусственных неоднородностях (СИН).

## 2.2. Продольные масштабы

Для большинства сеансов, в которых наблюдался эффект искусственных мерцаний, были определены времена развития флуктуаций  $\tau_1$  и время их релаксации  $\tau_2$  после выключения передатчика нагрева (см. рис. 2.1.4). 0 временах развития речь пойдет ниже, а значение  $\tau_2$  изменялось в пределах от 10 до 110 с со средним  $\langle \tau_2 \rangle \approx 50 - 70$  с. Релаксация мерцаний может быть связана с диффузионным расплыванием неоднородностей и с их дрейфом из ОВ. В предположении амбиполярной

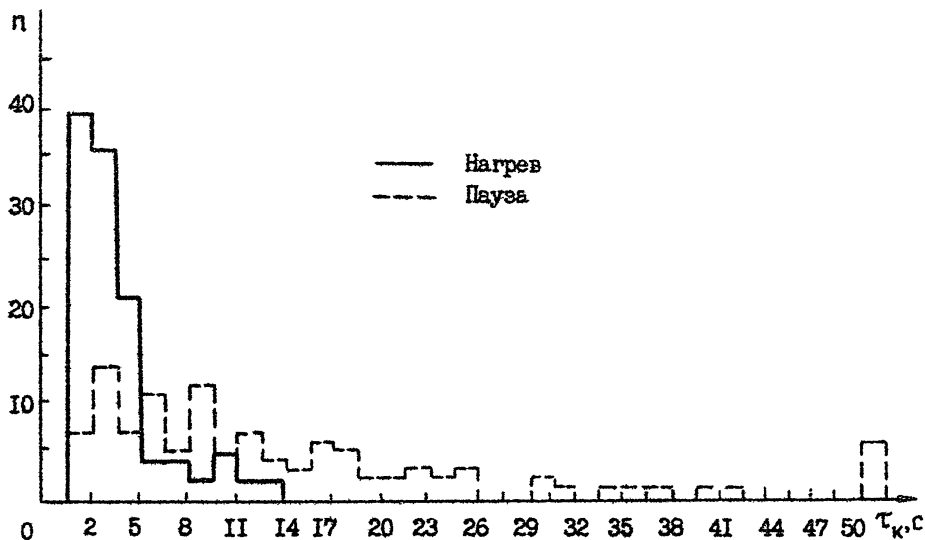


Рис. 2.2.1

диффузии вдоль магнитного поля для неоднородностей с  $l_{\perp} > 60 - 100$  м (см., например, [12]) можно определить продольные (вдоль магнитного поля) размеры неоднородностей  $l_{\parallel}$  из выражения  $l_{\parallel} \approx \sqrt{\tau_2 D_{a\parallel}}$ , где  $D_{a\parallel}$  - коэффициент амбиполярной диффузии. В условиях эксперимента величины  $D_{a\parallel}$  составляли  $(5-6) \cdot 10^9$  см<sup>2</sup> [2]. Отсюда получаем  $l_{\parallel} = 6 - 10$  км.

### 2.3. Степень анизотропии неоднородностей

Определив масштабы  $l_{\perp}$  и  $l_{\parallel}$ , можно найти параметр  $\eta = l_{\parallel}/l_{\perp}$ , характеризующий степень вытянутости неоднородностей вдоль геомагнитного поля. На рис. 2.2.2 точками показана зависимость  $\eta(l_{\perp})$ . Видно, что значения  $\eta(l_{\perp})$  хорошо описываются зависимостью  $\eta \sim l_{\perp}^{-1}$ , что свидетельствует об увеличении анизотропии неоднородностей  $\eta$  при уменьшении масштаба  $l_{\perp}$ . Отметим, что подобный результат был ранее получен в [13] для искусственных неоднородностей с масштабами  $l_{\perp} \gtrsim 1$  км. Таким образом, зависимость  $\eta \sim l_{\perp}^{-1}$  имеет место для достаточно широкого спектра размеров  $l_{\perp}$ .

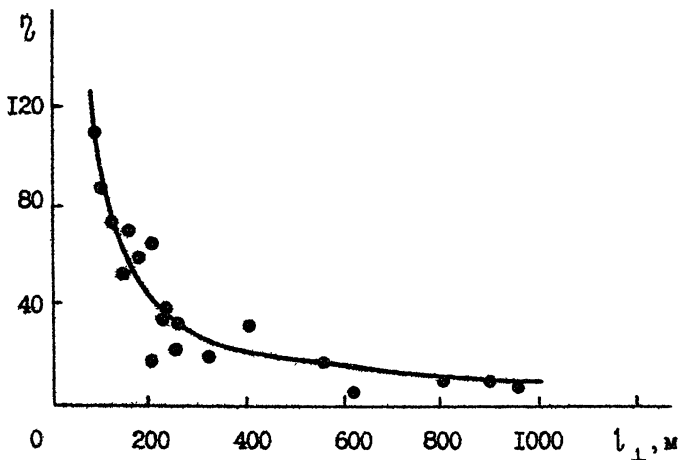


Рис. 2.2.2

#### 2.4. Отклонения электронной концентрации

Во всех случаях, когда амплитуда сигналов распределена по закону Гаусса, а индекс флуктуаций меньше единицы, согласно [14], можно оценить величину относительных изменений электронной концентрации  $\Delta N_e / N_{e0}$  в СИИ, которая составила  $(1 - 5) \cdot 10^{-3}$ . Анализ результатов показал зависимость индекса флуктуаций от интервала корреляции  $\tau_k$ , которая представлена на рис. 2.2.3 для  $f_{n2} = 5,65$  МГц. Пунктиром нанесена прямая, вычисленная по экспериментальным данным методом наименьших квадратов. Известно [14], что при  $F < 1$  (в случае малых набегов фазы) индекс флуктуаций  $F \sim (\Delta N_e / N_{e0})^2 l_{\perp}$ , поэтому в области исследуемых масштабов  $l_{\perp}$  линейную зависимость  $F$  от  $l_{\perp}$  можно объяснить при условии  $\Delta N_e / N_{e0} = \text{const}$  (по крайней мере, на участке  $F < 1$ ). Не исключено, что данное утверждение справедливо для масштабов  $l_{\perp} \sim 100 - 1000$  м. Действительно, в работе [15] приведена зависимость  $\delta N_e \sqrt{\langle \Delta N_e^2 \rangle} / \langle N_e \rangle^2$  от поперечного масштаба  $l_{\perp}$ , откуда следует, что для  $l_{\perp} \sim 100 - 1000$  м величина  $\delta N_e$  изменяется в сравнительно небольших пределах: от  $5 \cdot 10^{-3}$  до  $7 \cdot 10^{-3}$ .

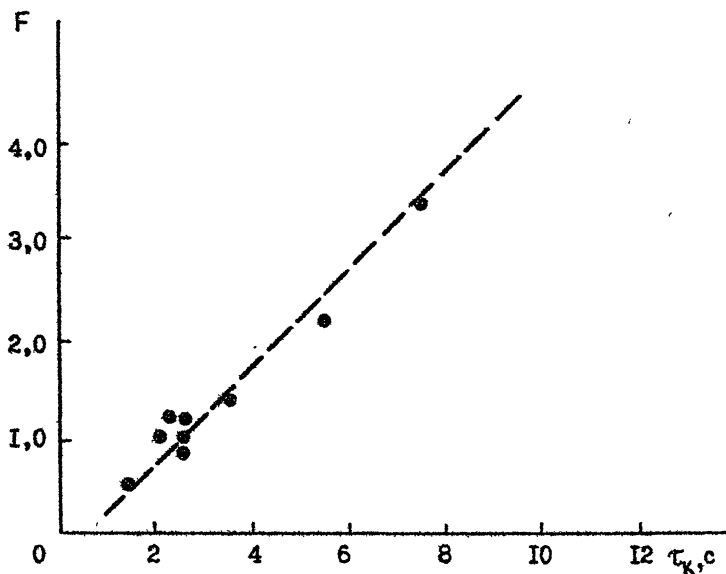


Рис. 2.2.3

## 2.5. Времена развития искусственных неоднородностей

В предположении, что время  $\tau_1$  определяется временем развития неоднородностей, в эксперименте были получены значения времени развития СИИ от 3 до 40 с со средним значением  $\langle \tau_1 \rangle \approx 20$  с. Отметим, что в эксперименте [16] при работе ВП с  $P_0 \approx 100$  МВт измерены значения  $\tau_1 \approx (3 - 10)$  с, а в работе [17] при  $P_{G_3} \approx 20$  МВт -  $\tau_1 \approx (20 - 50)$  с. Полученные в нашем эксперименте при  $P_0 \approx 50$  МВт величины  $\tau_1$  лежат в диапазоне  $\tau_1(100 \text{ МВт}) \leq \tau_1(50 \text{ МВт}) \leq \tau_1(20 \text{ МВт})$ , что согласуется с выводами теории самофокусирующей неустойчивости [18], которая хорошо объясняет образование неоднородностей указанных масштабов. С целью исследования связи между временами развития и релаксации был построен график  $\tau_2(\tau_1)$  по значениям  $\tau_2$  и  $\tau_1$ , определённым для каждого сеанса нагрева, из которого следует зависимость  $\tau_2(\tau_1)$ , близкая к линейной - см. рис. 2.2.4. Пунктиром нанесена прямая, найденная методом наименьших квадратов. Заметим, что в пре-



длущих работах по исследованию неоднородностей с  $l_{\perp} \approx 100 - 1000$  м

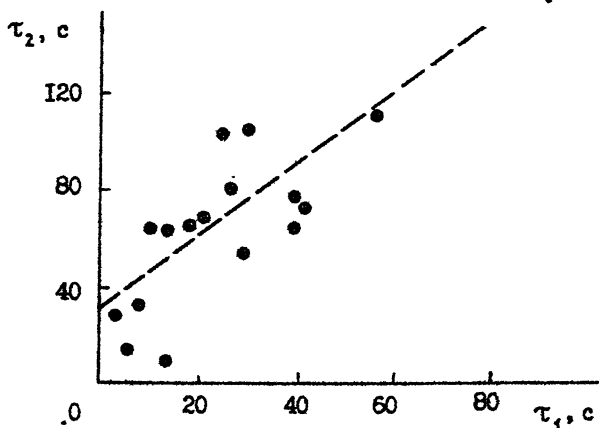


Рис. 2.2.4

такой связи не отмечалось<sup>+)</sup> . Эта зависимость свидетельствует об определенной роли продольной диффузии не только в релаксации неоднородностей, но и в их образовании.

## 2.6. Вертикальные размеры ОБ

Для оценки вертикальных размеров  $L_{\theta}$  области, занятой СИН, можно воспользоваться очевидным условием  $L_{\theta} > l_{\parallel}$ , откуда  $L_{\theta} > 10$  км. Далее, привлечем результаты наблюдений искусственных мерцаний пробных радиоволн двух частот. Так, например, 15.06.81 в сеансах нагрева искусственные мерцания наблюдались с вероятностью  $\sim 60\%$  и  $\sim 80\%$  на частотах  $f_{п2} = 5,65$  МГц и  $f_{п4} = 7,5$  МГц. Изменения средней амплитуды при этом были примерно одинаковы.

Для интерпретации результатов на ЭВМ рассчитывались траектории радиоволн с учетом магнитного поля по методике [20]. Проекция траек-

<sup>+)</sup>  В [19] исследовалась зависимость времен развития и релаксации ракурсно-рассеянного сигнала от эффективной высоты области возмущения, откуда связь  $\tau_2(\tau_1)$  в принципе может быть получена для  $l_{\perp} < 10$  м.

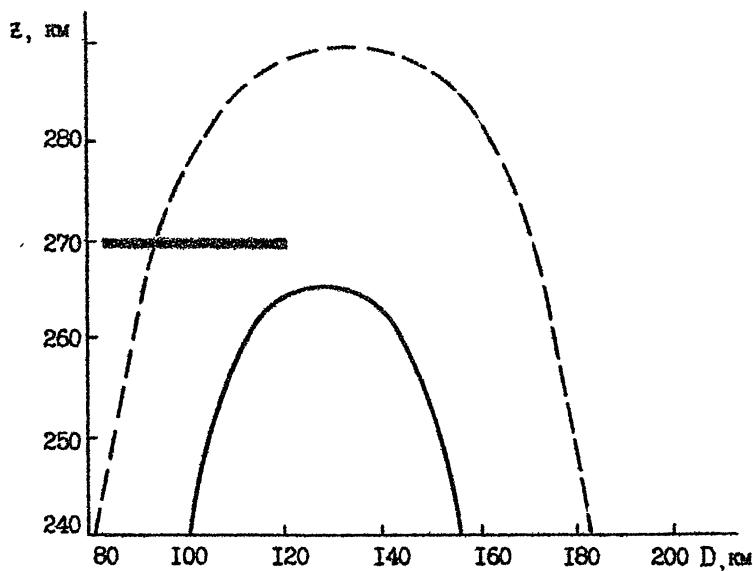


Рис. 2.2.5

с  $f_{n2} = 5,65$  МГц (сплошная линия) и  $f_{n1} = 7,5$  МГц (пунктир) представлены на рис. 2.2.5 для трассы длиной 260 км. Расчеты проведены для параболической модели F-слоя ионосферы с высотой максимума  $z_m = 340$  км и полутолщиной  $Y_m = 100$  км при  $f_oF2 = 8$  МГц, что соответствует условиям эксперимента. Размер ОБ по горизонтали, определяемый диаграммой направленности (ДН) антенны стенда "Сура" на частоте  $f_o = 5,455$  МГц на уровне  $0,5 P_{max}$  на высоте отражения отмечен штриховкой. Из рис. 2.2.5 следует, что полутолщина области с СИИ (точнее, её верхняя часть от уровня отражения при  $f_o = 5,455$  МГц) превышала 15 - 30 км.

### 2.7. Горизонтальные размеры ОБ

Для оценок горизонтальных размеров  $L_r$  области с СИИ можно использовать результаты наблюдения эффектов нагрева в зависимости от

характера траекторий сигналов на одной частоте  $f_{\text{п}}$ . Как показал проведенный анализ, для трассы 260 км, например, 19.06.81 г. эффект искусственных меридиан проявлялся примерно в 90% сеансов при одном отражении и примерно в 30% сеансов при двух отражениях от F-слоя. Изменения средней амплитуды и коэффициента вариации коррелировало с нагревом в 80 и 50% сеансов соответственно. Видно, что вероятность наблюдения тех или иных эффектов, связанных с нагревом, на двукратно отраженном пробном сигнале была в 2-3 раза меньше, чем на однократно. При этом, помимо уменьшения вероятности, и величина эффектов также была слабее.

На рис. 2.2.6 представлены проекции траекторий лучей на плоскость падения для "0" компоненты пробной волны с  $f_{\text{п2}} = 5,65$  МГц для трассы длиной 260 км. Геометрические параметры F-слоя были прежними, а значение  $f_0 F2 = 6,5$  МГц. Область ионосферы, освещаемая ДН антенны станда "Сура" по уровню  $0,5 P_{\text{max}}$  при  $f_0 = 5,455$  МГц, заштрихована. Из рис. 2.2.6 видно, что траектория однократно отраженного сигнала (сплошная линия) проходит вблизи центра ОБ. При полутолщине области с СИИ около 15 км горизонтальное расстояние от центра области нагрева до этой траектории составляет около 10 км. В то же время для двукратно отраженного сигнала (пунктир) это расстояние около 30 км, что, возможно, и обуславливает меньшую вероятность появления и величину наблюдаемых эффектов. Отсюда можно сделать вывод, что размер  $L_{\text{Г}}$  области с СИИ, определяемый по уменьшению вероятности наблюдения эффектов в 2-3 раза, в данном случае превышал 40 км. Отметим, что величина  $L_{\text{Г}} = 40$  км соответствует размеру области, освещаемой ДН антенны нагревного станда по уровню  $0,5 P_{\text{max}}$  на высоте 285 км (см. рис. 2.2.6).

Аналогичный анализ и расчеты, сделанные для почти "симметричной" трассы длиной около 200 км, показали, что размеры области по горизонтали не превышали 70 км, то есть  $40 \text{ км} < L_{\text{Г}} < 70 \text{ км}$ . Размер  $L_{\text{Г}} \approx 70$  км соответствует угловой ширине ДН антенны станда "Сура", определяемой по уровню  $0,04 P_{\text{max}}$ . Таким образом, СИИ обнаруживались при мощностях излучения  $P_3 \approx 2$  МВт, и величина  $L_{\text{Г}}$  превышала размер, определяемый по уровню  $0,5 P_{\text{max}}$ . Возможно, что уменьшение вероятности наблюдения эффектов и их интенсивности связано в определенной степени с уменьшением мощности нагрева на краях ДН.

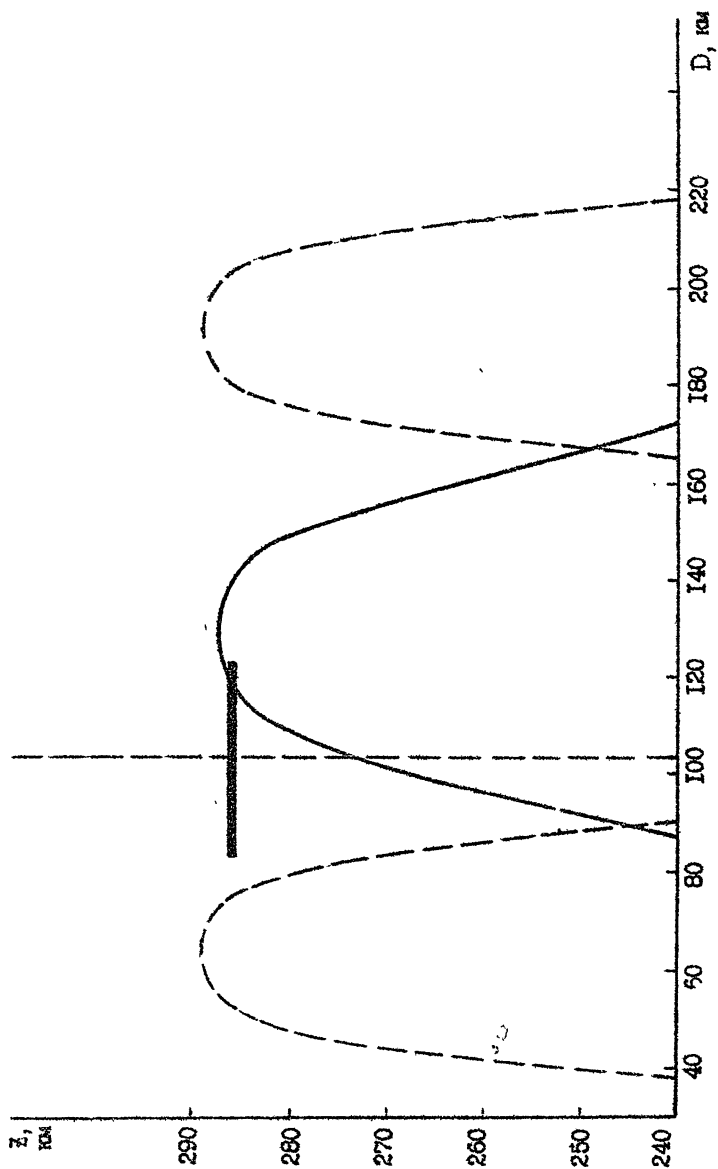


Рис. 2.2.6

### 3. ИЗМЕНЕНИЕ ДИСТАНЦИОННО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛОВ НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПРИ ИСКУССТВЕННОМ ВОЗМУЩЕНИИ F-СЛОЯ ИОНОСФЕРЫ

Возмущение F-слоя ионосферы мощным КВ радиоизлучением может приводить, как описано выше, к развитию неоднородностей электронной плотности с различными масштабами вплоть до размеров, определяемых угловой шириной диаграммы направленности антенны мощного наземного радиопередатчика [2]. Искусственные неоднородности в зависимости от длины волны и геометрии эксперимента определенным образом влияют на распространяющиеся через область возмущения (ОВ) радиоволны. В данном эксперименте проводились исследования влияния ОВ в слое F ионосферы на дистанционно-частотные характеристики коротковолновых сигналов НЗ, причем пункты излучения и приема, а также нагревный стелд располагались на одной дуге большого круга.

#### 3.1. Методика проведения эксперимента

Наблюдения проводились в течение двух недель в октябре 1982 г., в основном, с 17 до 21 час МДВ. Длина среднеширотной трассы НЗ составляла 1100 км. На конечных пунктах трассы синхронно работали станции наклонного зондирования "Сойка" [21] и "Базис" [22]. Примерно в середине трассы был расположен нагревный стелд "Сура" [1].

Станции НЗ "Базис" и "Сойка" работали в импульсном режиме в диапазоне частот 1,2 - 21,2 МГц. Длительность импульсов составляла 100 мкс, частота повторения - 25 Гц, полоса ПЧ приёмников - 15 кГц. В эксперименте использовался, в основном, режим, при котором один раз в минуту<sup>\*)</sup> последовательно излучались 400 импульсов, причём каждый последующий импульс - на новой частоте. Шаг по частоте составлял 50 кГц. Применялся также режим, когда последовательно излучались радиоволны на 10 частотах с шагом по частоте 700 кГц, причём на каждой частоте излучалось 12 импульсов и использовался метод усреднения. Ионозонд "Сойка" был сопряжён с ЭВМ М-6000, и проводилась цифровая обработка, что позволило определять задержки сигналов с точностью до 1,5 - 3 км.

---

<sup>\*)</sup> В этом случае за каждый интервал нагрева или паузы в работе "Суры" предполагалось получить 10 ионограмм НЗ.

Стенд "Сура" в этот период излучал мощные радиоволны вертикально вверх в течение 10 минут, затем следовала пауза 10 мин. В период эксперимента три передатчика стенда обычно работали на одной частоте ( $\frac{f}{f_0} = 5,828$  МГц). При этом секции антенны стенда включались синфазно или несинфазно, в результате чего изменялся горизонтальный размер ОВ поперек трассы.

### 3.2. Результаты наблюдений

Условия проведения эксперимента были таковы, что в отсутствие возмущения наблюдались дистанционно-частотные характеристики (ДЧХ), соответствующие моду I F 2. При работе "Суры" ( $P_3 \approx 50$  МВт, "0" компонента) в отдельных сеансах было обнаружено увеличение МПЧ исследуемой трассы. Этот эффект иллюстрирует рис. 2.3.1, где показана эволюция сигнала НЗ под влиянием нагрева, а также рис. 2.3.2, на котором представлен временной ход МПЧ за 2 сеанса нагрева. Видно, что ДЧХ в период нагрева в сеансе 18.20 - 18.30 как бы сдвигались (примерно на 0,3 - 0,5 МГц) в сторону высоких частот относительно ДЧХ в паузе. Так как измерения проводились в вечернее время, то оказалось, что обнаруженный эффект противодействует естественному ходу, выражавшемуся в уменьшении МПЧ со временем (см. рис. 2.3.2).

### 3.3. Модельный эксперимент

Увеличение МПЧ трассы может быть обусловлено эффектом рассеяния радиоволн на неоднородностях F-слоя. Этот эффект неоднократно наблюдался в естественных условиях и приводил к появлению характерного "носа" на ионограммах НЗ (см. например, [23]). К изменению МПЧ может приводить дополнительная рефракция лучей на отдельной неоднородности. Так, в работе [24] были рассчитаны ДЧХ на трассе длиной 2000 км, причём получено, что неоднородность с размерами в несколько сотен километров, расположенная в середине трассы, при определенных условиях может приводить к увеличению МПЧ. При этом вся ДЧХ "сдвигалась" в область высоких частот, а характерного "носа" на ионограммах не появлялось. Именно такой эффект и был обнаружен в эксперименте (см. рис. 2.3.1). Поэтому были проведены модельные расчеты изменений МПЧ из-за влияния искусственной крупномасштабной области возмущения с пониженной концентрацией электронов. Качественно этот эффект обус-

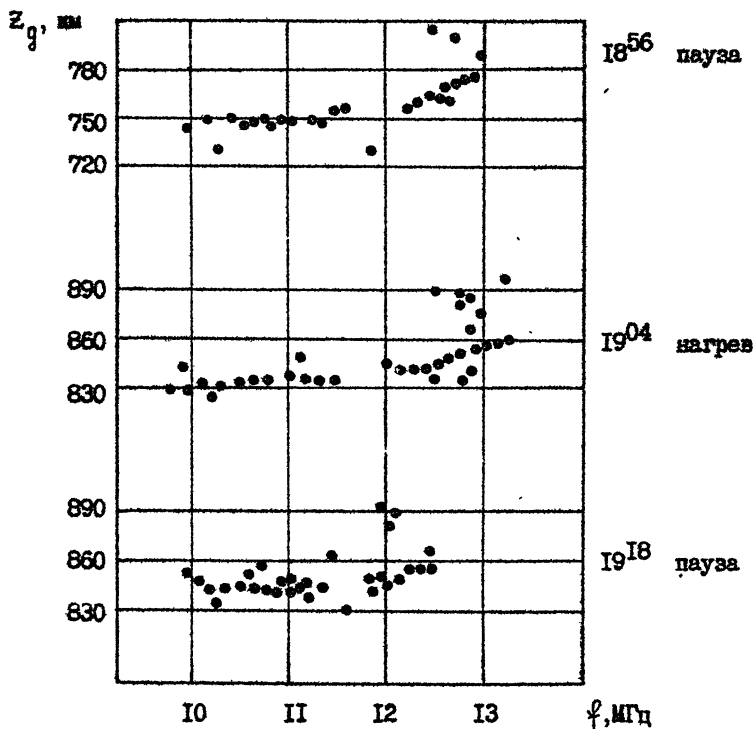


Рис. 2.3.1

ловлен тем, что лучи, в отсутствие возмущения проходившие без отражения через слой F, в результате дополнительной рефракции на OB отражались от ионосферы.

Модель OB и программа расчетов в целом были такими же, как в работе [25]. Однако программа была существенно модифицирована, так что в процессе счета определялась предельная частота (МЧ) волны, отражающейся от F-слоя, на трассе заданной протяженности. Горизонтальный масштаб OB задавался, исходя из угловой ширины диаграммы направленности антенны нагревного стенда при заданной частоте возмущающей волны  $f_0$ . Вертикальный масштаб определялся ионосферными условиями, со-

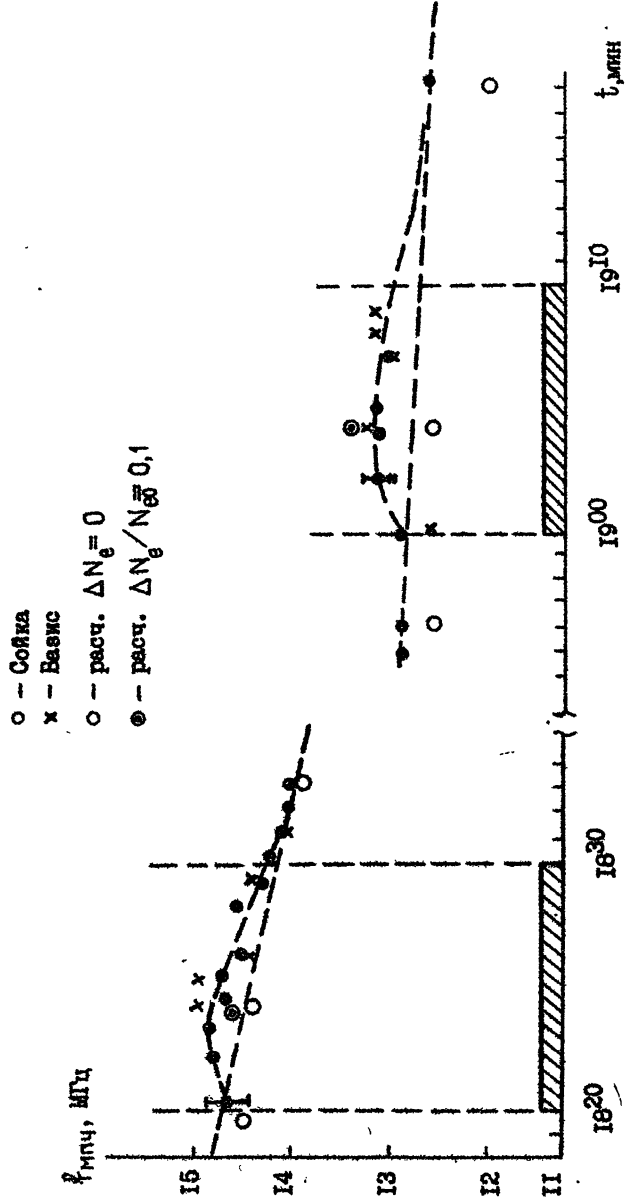


Рис. 2.3.2



ласно [25]. Ионосферная обстановка определялась, исходя из данных АИС в Горьком и цифрового ионозонда "Сойка" в Москве.

Было проведено сопоставление модельных расчетов с результатами эксперимента.

В табл. 2.3.1 для примера приведены значения  $f_oF_2$  в Горьком (1) и Москве (2), экспериментальные (в период нагрева) --  $f_{\text{эксп.}}$  и расчетные (при  $\Delta N_e / N_{e0} = 0,1$ ) --  $f_{\text{расч.}}$  значения МПЧ. Приведена также расчетная величина  $\Delta f$  абсолютного увеличения МПЧ, определенная по значениям МПЧ при наличии ОВ с  $\Delta N_e / N_{e0} = 0,1$  ( $f_{\text{расч.}}$ ) и в невозмущенных условиях ( $\Delta N_e / N_{e0} = 0$ ). Все значения даны в мегагерцах. Из таблицы видно хорошее совпадение экспериментальных и расчетных величин МПЧ при  $\Delta N_e / N_{e0} = 0,1$ , что вполне реально для эквивалентной мощности излучения 50 МВт. Отметим, что в сеансе 19 час и экспериментальные и расчетные отклонения МПЧ при нагреве превышают аналогичные

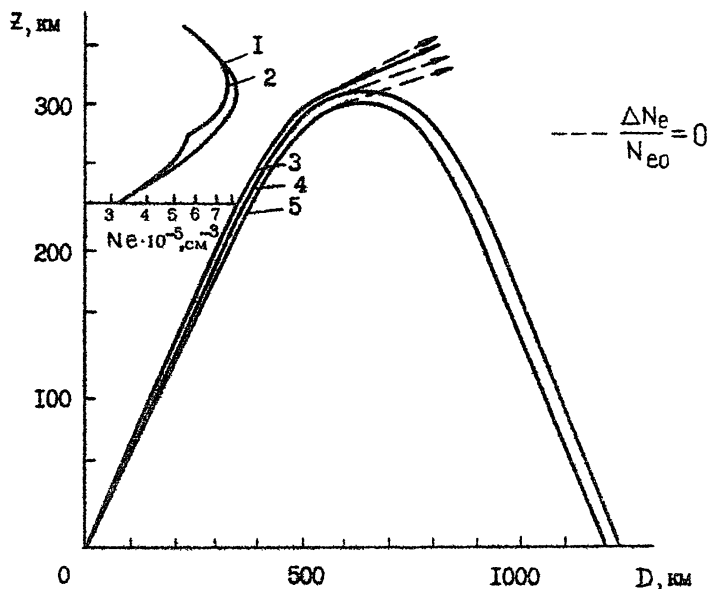


Рис. 2.3.3

Т а б л и ц а 2.3.1

	$(f_0 F2)_1$	$(f_0 F2)_2$	$f$ эксп.	$f$ расч.	$\Delta f$
1.	7.7	8.25	13.3	13.4	0.8
2.	8.2	9.6	14.75	14.65	0.25

изменения для сеанса 18 час 20 мин. Возможно, это связано с увеличением эффективности нагрева при приближении  $f_0$  к  $f_0 F2$  (что отмечалось в [26]) или с геометрией попадания лучей в ОВ.

На рис. 2.3.3 для примера приведены траектории лучей в отсутствие возмущения и при наличии ОВ на одной и той же частоте  $f = f_{мпч}$ , рассчитанной для  $\Delta N_e / N_{oe} = 0,1$ . Видно, что дополнительная рефракция на ОВ приводит к отражению от F-слоя луча, ранее проходившего через ионосферу.

#### 4. ВЛИЯНИЕ ОБЛАСТИ ВОЗМУЩЕНИЯ И ЕЕ НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРЫ НА АМПЛИТУДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КВ-СИГНАЛОВ НА ТРАССАХ РАЗЛИЧНОЙ ПРОТЯЖЕННОСТИ

##### 4.1. Азимутальная фокусировка пробных волн, проходящих через ОВ, на трассах НЗ длиной около 3000 км

В части I показано, что крупномасштабное возмущение F-слоя ионосферы с пониженной концентрацией электронов воздействует на проходящие через него радиоволны подобно фокусирующей линзе. В разд. I.2.1 в лучевом приближении методом теории возмущений сделаны расчеты изменений амплитуд пробных волн, прошедших через искусственную неоднородность гауссовой формы, на односкачковой трассе наклонного зондирования. Расчетные изменения амплитуды волны для случая нагрева F-слоя показаны на рис. I.2.2. Длина трассы была выбрана 3000 км, максимальное отклонение в центре линзы задавалось  $\Delta N_e / N_{e0} = 0,1$  и 0,2; рабочая частота  $f = 19$  МГц. Значения частот возмущающей волны задавались 4,6 МГц (сплошные линии) и 5,75 МГц (пунктир). Характерные масштабы линзы определялись, исходя из размеров диаграммы направленности антенн возмущающего передатчика на указанных частотах нагрева. Невозмущенная амплитуда на рис. I.2.2 равна единице.

Из рис. I.2.2 следует, что увеличение амплитуды пробного сигнала

( $K > 1$ ), вызванное азимутальной фокусировкой радиоволн, прошедших через искусственную линзу, должно наблюдаться в области с поперечным к трассе размером порядка 100 км. Вне этой области фокусирующие свойства ОВ приводят к ослаблению амплитуд ( $K < 1$ ) пробных волн.

Экспериментальные исследования азимутальной фокусировки были проведены последовательно на двух однокачковых трассах, начиная с 1978 года [27]. В первой серии наблюдений приемный пункт располагался вне области фокусировки (его расположение относительно трассы, проходящей через центр ОВ, отмечено на рис. 1.2.2 вертикальным пунктиром). При работе горьковского ВП (Зименки) циклами по 5 или 10 мин с такими же паузами наблюдалось уменьшение амплитуд пробных сигналов в среднем на 15 - 30%. Эффекты появлялись, когда частота ВП была близка к критической частоте слоя F, причем разность между ними не превышала значений  $\Delta F = 2 - 2,5$  МГц, что, по-видимому, было связано с более эффективным нагревом ионосферы в этих условиях. Полученный результат объясняется проявлением фокусирующих свойств ОВ в азимутальной плоскости.

В следующей серии наблюдений (март - июнь 1980 г.) пробные волны излучались на 4 частотах, а приёмный пункт был расположен на трассе, проходящей через центр ОВ. В этом случае, согласно рис. 1.2.2 (при  $\chi = 0$ ), можно было ожидать увеличения амплитуд пробных сигналов при работе ВП, что и было обнаружено в эксперименте. При работе ВП циклами по 10 мин с такими же паузами на частоте  $f_0 = 5,75$  МГц амплитуда пробных волн в отдельных сеансах возрастала на 20-40%. Времена развития и релаксации изменений амплитуды составляли 5-7 мин, что согласуется с расчетными и обнаруженными в предыдущем эксперименте временами формирования искусственной ОВ. Знаки эффектов и их величина согласуются с расчетными значениями изменений амплитуды на рис. 1.2.2.

Таким образом, наблюдения, проведенные с использованием ВП  $P_3 = 20$  МВт на двух трассах, проходивших через центр и через край ОВ, подтвердили выводы о наличии фокусирующих свойств у крупномасштабной искусственной неоднородности.

В продолжение этих исследований в феврале-марте 1983 г. был проведен эксперимент по приёму КВ сигналов, прошедших через искусственное возмущение одновременно на трёх трассах КЗ. Область возмущения создавалась с помощью более мощного, чем в ранних наблюдениях, нагревного стенда "Сура" ( $P_3 \approx 80 - 100$  МВт). Наблюдения проводились в

дневное время с 10 до 16 час МДВ. Как и раньше, интервалы нагрева и паузы составляли 10 мин. Частоты волн нагрева и пробных волн выбирались, исходя из месячных прогнозов МПЧ и параметров слоя F. Отметим, что, в отличие от предыдущих экспериментов, в данном случае можно было создавать ОВ, протяжённую по высоте, когда каждый из трёх передатчиков стенда работал на своей фиксированной частоте.

Приём сигналов пробных волн проводился одновременно в трёх пунктах: Надым, Сергино, Тарко-Сале, располагавшихся на севере Тюменской области. Отметим, что используемая в Надыме аппаратура позволяла разделять отдельные моды распространения. Длина данной трассы НЗ составляла 3100 км. Приёмный пункт в Надыме был смещен к северу на 190 км от дуги большого круга, проходящей через центр ОВ (Васильсурск). На этой дуге располагался приёмный пункт Сергино (длина трассы 2700 км), а п.Тарко-Сале был расположен на 70 км к северу от неё. Согласно теоретическим расчетам (см. рис. 1.2.2), можно было ожидать увеличения амплитуд пробных сигналов в период нагрева в пунктах Сергино и Тарко-Сале и их уменьшения в п.Надым. По результатам эксперимента, из сопоставления влияния нагрева на амплитуду пробных сигналов в трёх пунктах, предполагалось получить данные о пространственных параметрах ОВ.

Для приёма сигналов в п.Сергино и п.Тарко-Сале применялись дипольные антенны и приёмники Р-326 и Р-250М. Для регистрации сигналы ПЧ с приёмников подавались на специальные блоки пиковых детекторов и усилителей НЧ, а далее проводилась запись на ленту самопишущего устройства. Постоянная времени пиковых детекторов составляла менее 0,1 с. Скорость движения ленты была выбрана 0,5 - 1,0 мм/с.

Характеризуя условия эксперимента в целом, отметим, что работа, как правило, велась при довольно больших значениях МПЧ трассы, достигавших 28-30 МГц. В то же время рабочие частоты не превышали 17-19 МГц. Это привело к тому, что принимаемые сигналы имели многолучевую структуру. Очевидно, в этих условиях выделение эффектов возможно было только при съеме значений амплитуды с фиксированной дальности.

Для примера на рис. 2.4.1 приведены изменения нормированной амплитуды во времени (п. Надым) для двух значений задержки, отличающихся на 0,5 мс (обозначены луч 1 и луч 2). Значение амплитуды в данную минуту получено путем усреднения по 25 значениям, снятым через 2,4с. Все минутные значения нормированы на среднюю амплитуду за последнюю минуту паузы, затем проведено сглаживание по трём точкам. На рисунке

штриховкой отмечен период нагрева и приведены значения  $\Delta F = f_2 - f_0$  и величины МПЧ (3000), соответствующие данному периоду наблюдений.

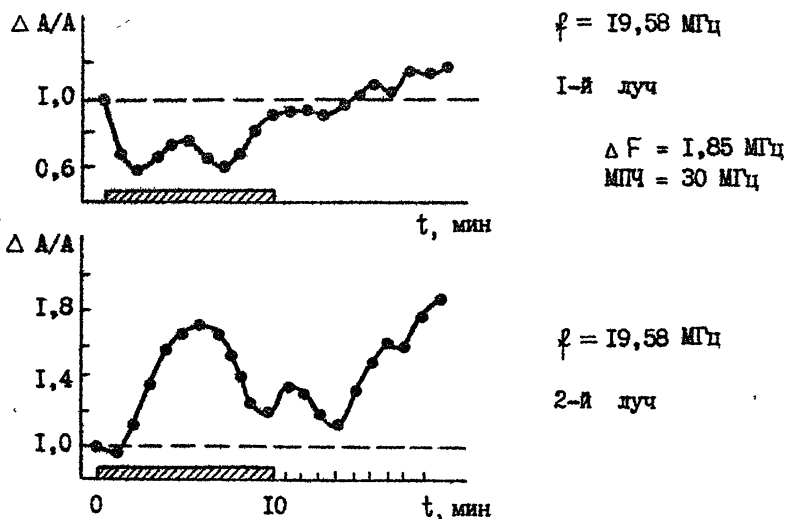


Рис. 2.4.1

Из рис. 2.4.1 видно, что изменения амплитуды для разных лучей существенно отличаются друг от друга. На первом луче наблюдается уменьшение амплитуды на 40%, которое в определенной степени коррелирует с нагревом. Изменения амплитуды на втором луче не коррелируют с нагревом. Сопоставление абсолютных значений амплитуд двух лучей показало, что амплитуда второго луча в данном случае в несколько раз превышала амплитуду первого. Поэтому можно было ожидать, что пиковые детекторы в пунктах Сергино и Тарко-Сале зарегистрируют именно амплитуду второго луча, как максимальную. Дополнительный анализ неусредненных флуктуаций амплитуды в этом сеансе показал, что, действительно, записи в Сергино и Тарко-Сале хорошо коррелируют с изменениями во времени амплитуды второго луча. Отсюда был сделан вывод, что обнаружение эффектов нагрева при использовании пиковых детекторов возможно только при отсутствии многолучевости. Это, как известно, имеет место

при работе вблизи МПЧ (3000).

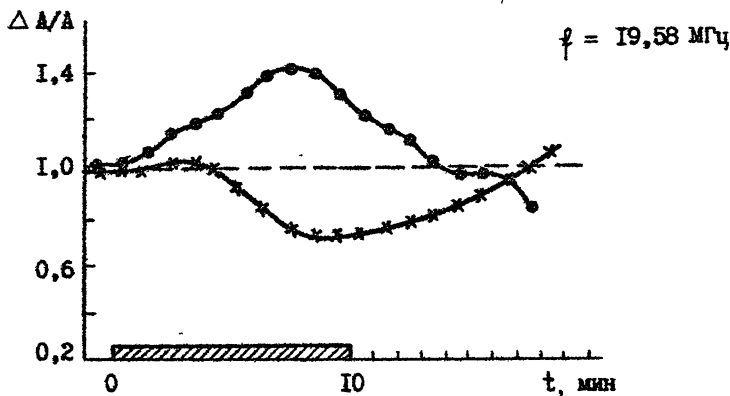


Рис. 2.4.2

Именно такая ситуация наблюдалась, например, 4.03.83 г. в период 13 час 40 мин – 14 час 00 мин МДВ. На рис. 2.4.2 приведены изменения амплитуд сигналов в Надыме (крестики) и Тарко-Сале (кружки). Из рис. 2.4.2 видно, что изменения амплитуд в этих пунктах имеют разные знаки и в определенной степени коррелируют с нагревом.

Наблюдаемые изменения амплитуд качественно согласуются с расчетными на рис. 1.2.2. При сопоставлении их необходимо иметь в виду, что расстояние между пунктами Надым и Тарко-Сале составляет  $\Delta x = 120$  км. Наилучшее соответствие достигается для  $f_0 = 5,7$  МГц при  $\Delta N_e / N_{e0} = 0,2$  и  $h' = 25$ , если  $x_1 = 90$  км (Надым) и  $x_2 = 30$  км. Последнее возможно при смещении к северу центра ОВ на 40 км, что соответствует сдвигу нуля по  $x$  на рис. 1.2.2 примерно на 100 км. Такое смещение вполне возможно при учете отклонения к северу луча обыкновенной компоненты мощной волны при  $f_0 \sim f_0 F2$  или из-за влияния регулярных дрейфов плазмы в области F.

В целом, по данному циклу измерений эффекты влияния искусственной крупномасштабной неоднородности на распространение КВ сигналов наблюдались, по нашему мнению, примерно в 20% сеансов, когда выполнялись оптимальные условия нагрева и прохождения пробных радиоволн через область возмущения.

#### 4.2. Изменение статистических характеристик пробных радиоволн при НЗ области возмущения на коротких трассах

Выше уже приводилась часть результатов по влиянию среднemasштабных искусственных неоднородностей на распространение радиоволн, которые были в той или иной мере необходимы для оценок. В этом разделе приведены данные, касающиеся только этого влияния и представляющие самостоятельный интерес.

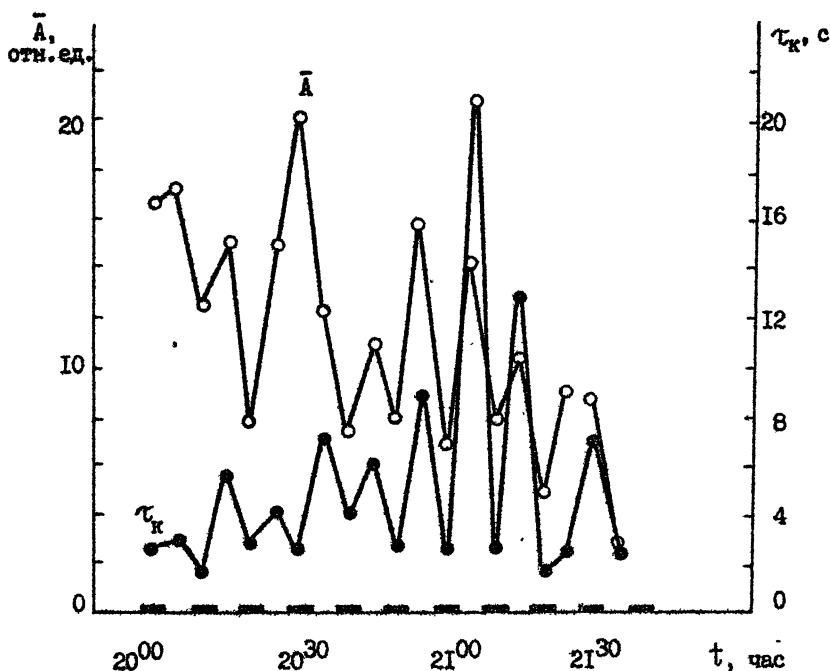


Рис. 2.4.3

На рис. 2.4.3 для примера приведены изменения  $\tau_k(t)$  (точки) за 19.06.81 г. Видно, что в периоды нагрева наблюдалось значительное уменьшение  $\tau_k$  (в среднем 1,5 - 5 раз и более) с последующим возрастанием в паузе (см. также рис. 2.2.1).

Наряду с уменьшением временного интервала корреляции при нагреве

наблюдалось уширение спектра амплитудных флуктуаций ПВ. В отдельных сеансах появлялись максимумы спектральной плотности на частотах  $\nu \approx (1 - 4) \cdot 10^{-2}$  Гц. Задавая  $V = 60 - 100$  м/с, получаем  $l_{\perp} \approx 1,5 - 10$  км. Таким образом, максимумы в спектрах  $S(\nu)$  обусловлены километровыми неоднородностями.

В эксперименте обнаружены изменения распределений амплитуды сигналов, коррелирующие с нагревом. Наиболее часто встречался логарифмически нормальный закон распределения, что в общем характерно для трасс НЗ (см., например, [28]). Отдельно следует обратить внимание на несколько сеансов нагрева 19.06.81 г., когда влияние СНИ проявилось не только в заметном уменьшении  $\tau_K$ , но и в резком изменении характера амплитудных распределений. Так, логарифмически нормальное распределение, характерное для паузы, в период нагрева трансформировалось в распределение Райса с параметрами, вычисленными по экспериментальным данным. Иллюстрацией этому является рис. 2.4.4, где изображена последовательность  $W(A)$  во время нагрева (точки) и паузы (xxx,  $\Delta\Delta\Delta$ ) в работе ВП. Здесь  $W(A) = n_i / n \Delta A$ , где  $\Delta A$  — интервал группирования амплитуд,  $n_i$  — число отсчетов  $A$  в этом интервале,  $n$  — общее число отсчетов. Сплошными линиями показаны аппроксимирующие распределения.

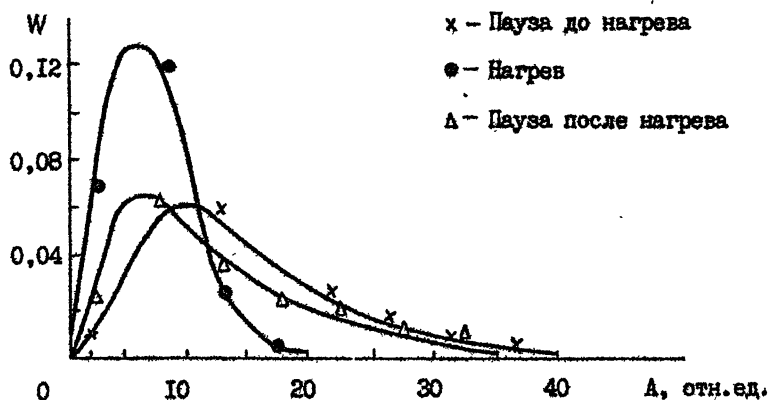


Рис. 2.4.4



Отношение моментов  $\gamma = \langle A^2 \rangle / \langle A \rangle^2$ , как правило, превышало значения  $\gamma_{\text{пред.}} = 4/\pi$ , допустимое для распределения Райса [10], за исключением нескольких сеансов нагрева. В тех сеансах, где распределение амплитуд пробных волн аппроксимировалось законом Райса, оценивалась доля рассеяния энергии  $\langle E_S^2 \rangle$  по отношению к зеркальной компоненте  $\langle E_0^2 \rangle$ , и эта величина составила  $\langle E_S^2 \rangle / \langle E_0^2 \rangle \approx 0,5 - 0,8$ .

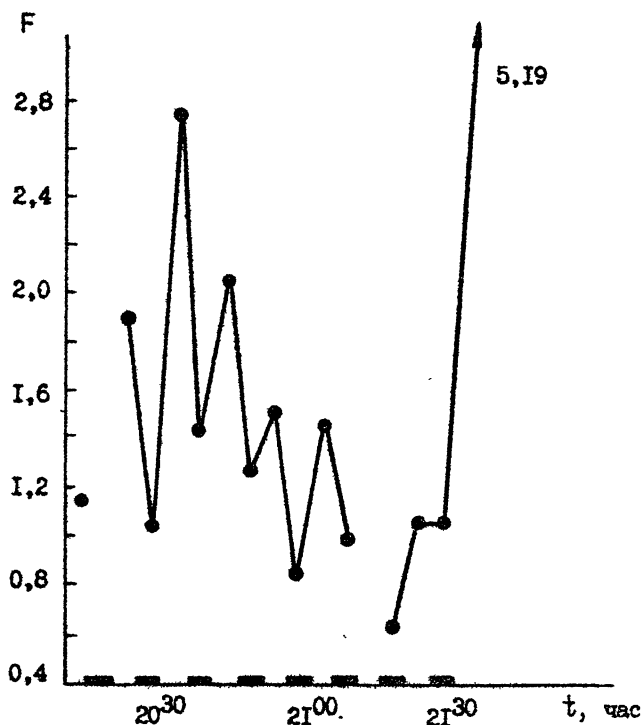


Рис. 2.4.5

Для этого же периода характерно уменьшение индекса флуктуации  $F = (\langle J^2 \rangle - \langle J \rangle^2) / \langle J \rangle^2$  ( $J$  - интенсивность сигнала) во время нагрева по отношению к паузе, которое наблюдалось только для сигналов, однократно отражённых от ионосферы (см. рис. 2.4.5). Этот эффект может быть связан с возникновением вследствие самофокусиро -

вочной неустойчивости мощной радиоволны расслоения плазмы, характерный масштаб которого  $l_{\perp} \approx 200 - 450$  м (см. ниже). При этом можно ожидать уменьшения индекса флуктуаций в период нагрева, если в паузе  $l_{\perp} > 1$  км, что подтверждается большими значениями времени корреляции в паузе.<sup>+) Напомним, что для  $f_{n2} = 5,65$  МГц при нагреве наблюдалась зависимость  $F(\tau_k)$  или  $F(l_{\perp})$  (см. рис. 2.2.3), из которой следует увеличение  $F$  с ростом масштаба неоднородности.</sup>

Наконец, остановимся на влиянии СИИ на среднюю амплитуду  $\langle A \rangle$  пробных сигналов. В ряде случаев было обнаружено уменьшение амплитуды  $\langle A \rangle$  во время нагрева по отношению к невозмущенным условиям (см. рис. 2.4.3, кружки). Можно полагать, что это связано с рассеянием радиоволн на СИИ. При этом ослабление амплитуд СВ должно наблюдаться, когда углы рассеяния  $\theta_s$  на СИИ будут больше угловой ширины ДН приёмной антенны  $\theta_A$  или (в случае изотропной ДН) углового размера  $\theta_0$  области возмущения, то есть при  $\theta_s > \theta_A, \theta_0$ . В условиях эксперимента, когда наблюдалось рассеяние вперед,  $\theta_s \sim \lambda/L$  [10], где  $\lambda$  - длина волны в среде. Оценки показывают, что при  $l_{\perp}^1 \sim 200 - 1000$  м можно ожидать ослабления амплитуд СВ частотой  $f_n < 5,8 - 16$  МГц, что согласуется с результатами эксперимента.

Изучение среднемасштабных неоднородностей, образующихся при нагреве  $F$ -слоя ионосферы мощным СВ радиоизлучением, является актуальной задачей как для уточнения модели СВ, так и для практических вопросов, связанных с распространением СВ сигналов через СВ. В настоящее время для теоретической интерпретации образования таких неоднородностей привлекается теория самофокусировочной неустойчивости (см., например, [6]). Теория предсказывает образование вытянутых вдоль магнитного поля  $H_0$  неоднородностей с характерным поперечным к  $H_0$  размером  $l_{\perp}^*$  (масштаб расслоения):

$$l_{\perp}^* \approx 20 \frac{c}{\omega_0} \sqrt{\frac{L_T}{L_N}}, \quad (2.4.1)$$

где  $c$  - скорость света,  $\omega_0$  - плазменная частота в точке нагрева,  $L_N$  и  $L_T$  - характерные длины продольной диффузии и теплопроводности.

Для ночных условий можно полагать [2]  $L_T = 103$ ,  $L_N = 16$  км

<sup>+) При оценках  $l_{\perp}$  авторы учли экспериментально установленный факт равенства скоростей дрейфовых движений искусственных и естественных неоднородностей [9].</sup>

( $z = 250$  км) и  $L_T = 99$ ,  $L_N = 72$  км ( $z = 300$  км). Тогда из (2.4.1) получаем  $l_{\perp}^* \approx 200 - 450$  м, что согласуется с результатами, приведенными в п. 2.2.1. Напомним, что в [17] исследовались масштабы  $l_{\perp} \approx 200 - 800$  м, а в [13] -  $l_{\perp} \sim 1 - 7$  км.

Минимальное время развития  $\tau^*$  самофокусирующей неустойчивости убывает с ростом  $E_0^2$ , характерного размера высотного изменения электронной концентрации  $\mu = \frac{1}{N_e} \frac{dN_e}{dz}$  и логарифмически медленно убывает с уменьшением масштаба расслоения [6]. Если оценить величину  $\tau^*$ , согласно [6], применительно к условиям эксперимента, то получаем значение  $\tau^* \approx 3 + 35$  с, что весьма близко к экспериментально полученным значениям  $\tau_1$  - времени установления (см. выше). Таким образом, время развития искусственных мерцаний в определенной степени дает представление о времени развития самофокусирующей неустойчивости.

Вариации  $\tau_1$  могут быть связаны, например, с изменением поглощения в нижней ионосфере (а, следовательно,  $E_0^2$ ) и изменениями ряда ионосферных параметров.

Характерное значение установившихся возмущений концентрации в СИИ, согласно [6], определяется как:

$$\Delta N_e / N_{e0} \leq 0,2 L_N / L_T.$$

Оценки по этой формуле при  $L_N = 16 - 72$  и  $L_T = 100$  км ( $z = 250 + 300$  км) дают верхнюю границу  $\Delta N_e / N_{e0} \leq 3 \cdot 10^{-2} - 10^{-1}$ , что не противоречит полученным в нашем эксперименте величинам  $\Delta N_e / N_{e0} = (1-5) \cdot 10^{-3}$ .

Из изложенного следует, что полученные результаты в целом хорошо объясняются теорией самофокусирующей неустойчивости.

Таким образом, при нагреве F-слоя ионосферы в области возмущения образуется целый спектр масштабов СИИ. Существование более "мелких", чем в естественных условиях, неоднородностей приводит к уменьшению  $\tau_k$  и уширению спектра  $S(\nu)$ , ослаблению амплитуд пробных волн, уменьшению индекса флуктуаций F и ряду других эффектов. Наличие в отдельных сеансах нагрева в спектрах  $S(\nu)$  максимумов свидетельствует о появлении неоднородностей с масштабами  $l_{\perp} \sim 2 - 10$  км. Такие неоднородности, судя по данным о  $\tau_k$ , часто проявлялись в естественных условиях в отсутствие нагрева. При работе станда "Сура", согласно [6], могло произойти их усиление в результате фокусировки на них мощной радиоволны. Поэтому есть основание предположить, что в

данном эксперименте наблюдались искусственные неоднородности с масштабами от  $l_1 \sim 200$  до  $l_1$  не менее 10 км.

#### 4.3. Определение эффективной скорости перемещения искусственного возмущения в F-слое ионосферы

Из записей амплитуд ПВ на коротких трассах определялось время появления  $\tau_1$  и  $\tau'_1$  дополнительных флуктуаций после включения мощного передатчика на  $f_{n1}$  и  $f_{n2}$  соответственно. Для анализа были отобраны те сеансы нагрева, когда  $\tau_1$  и  $\tau'_1$  можно было определить наиболее точно. Высоты отражений мощной радиоволны  $z_1$  и пробной волны с частотой 5,65 МГц  $z_2$  находились с использованием параболической модели F-области с параметрами, определяемыми из ионограмм вертикального зондирования. В табл. 2.4.I в качестве примера приведены значения критических частот F-области -  $f_oF_2$ , значения возмущающей частоты -  $f_o$ , время запаздывания  $\Delta\tau = \tau_1 - \tau'_1$ , разность высот отражения  $\Delta z = z_1 - z_2$ , значения эффективной скорости возмущения -  $v_{эфф.} = \Delta z / \Delta\tau$  и эквивалентная мощность излучения -  $P_э = P \times G$ .

Т а б л и ц а 2.4.I

Дата, время	$f_o F_2$ , МГц	$f_o$ , МГц	$\Delta\tau$ , с	$\Delta z$ , км	$v_{эфф.}$ км/с	$P_э$ , МВт
I	2	3	4	5	6	7
15.06.81 г. 17.20	7,4	5,828	8	14	1,75	37
15.06.81 г. 17.50	7,3	5,455	14	4	0,3	19
15.06.81 г. 18.20	7,1	5,828	2	13	6,5	38
15.06.81 г. 18.40	7,1	5,828	5	13	2,6	38
15.06.81 г. 19.10	7,1	5,828	5	12	2,4	40
15.06.81 г. 19.20	7,2	5,828	3	12	4	40

I	: 2	: 3	: 4	: 5	: 6	: 7
17.06.81 г. 17.10	6,9	5,828	5,5	II	2	56
17.06.81 г. 17.20	6,9	5,828	II6	I3	0,II	56
17.06.81 г. 17.50	6,8	5,455	32	5,5	0,17	18
17.06.81 г. 21.40	7,2	5,455	II	4,5	0,41	20
18.06.81 г. 16.20	7,15	5,828	22	II	0,5	50
18.06.81 г. 17.20	7,15	5,828	22	II	0,5	50
18.06.81 г. 17.50	6,9	5,455	26	4,8	0,18	18
18.06.81 г. 18.20	6,8	5,828	96	I6	0,17	53
25.06.81 г. 18.20	7,3	5,828	25	I2,4	0,5	50
25.06.81 г. 21.48	7,3	5,828	0,5	II	22	50
25.06.81 г. 22.48	7,3	5,828	21,5	II,5	0,53	50

Из таблицы видно, что при воздействии на ионосферу мощным радиоизлучением частотой 5,828 МГц эффективная скорость перемещения возмущения лежит в интервале  $0,11 \text{ км/с} < \mathcal{V}_{\text{эфф.}} < 22 \text{ км/с}$  со средним значением  $\langle \mathcal{V}_{\text{эфф.}} \rangle \approx 1,95 \text{ км/с}$  (при вычислении среднего отброшены минимальное и максимальное значения), при воздействии частотой 5,455 МГц -  $0,17 \text{ км/с} < \mathcal{V}_{\text{эфф.}} < 0,41 \text{ км/с}$  со средним значением  $\langle \mathcal{V}_{\text{эфф.}} \rangle \approx 0,26 \text{ км/с}^+)$ . Предполагалось, что неоднородности, ответственные за

<sup>+)</sup>  Отметим, что в работе [17] получены значения  $\mathcal{V}_{\text{эфф.}} \approx 200 - 400 \text{ м/с}$  при распространении возмущения вверх от уровня нагрева.

флуктуации амплитуды ПВ, образуются вблизи уровня отражения мощной радиоволны за счет самофокусирующей неустойчивости [6]. Если рассмотреть два возможных механизма проникновения неоднородностей на другие высоты (в данном случае вниз от уровня образования): прогрев ионосферы вдоль силовых линий магнитного поля [6] и амбиполярную диффузию, то оказывается, что в первом случае скорость перемещения возмущения для условий эксперимента составит  $v_T \approx 4\epsilon_{\text{eff}} / \Delta z N_{e0} \approx 25$  км/с, а во втором случае -  $v_{\text{а.д.}} \approx D_a / \Delta z \approx 0,2$  км/с. Из сопоставления этих значений со средней скоростью перемещения возмущения при нагреве на  $f_{01}$  видно, что  $v_{\text{а.д.}} < v_{\text{эфф.}} < v_T$ ; при нагреве ионосферы на  $f_{02} - v_{\text{эфф.2}} \sim v_{\text{а.д.}}$ . Существенное отличие в значениях  $v_{\text{эфф.1,2}}$  связано, по-видимому, с различием в излучаемой мощности (см. табл. 2.4.1). Можно предположить, что при малых мощностях нагрева ( $P_3 < 20$  МВт) за перемещение возмущения ответственна амбиполярная диффузия, а при больших - определяющую роль начинает играть теплопроводность.

## 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИ ВОЗМУЩЕНИИ Е-СЛОЯ ИОНОСФЕРЫ

В эксперименте [30] увеличение электронной концентрации в Е-слое под воздействием нагрева было обнаружено по изменению действующей высоты отражения пробных радиоволн.

Источником нагрева служил передатчик, работавший на частоте 4,6 МГц и имевший эффективную мощность  $P_3 = \rho \times G \approx 15$  МВт ( $G$  - КНД антенны). Ожидаемое увеличение  $\Delta N_e / N_{e0}$  - электронной концентрации для такой мощности радиоизлучения невелико. Это видно из следующей оценки. Изменение температуры электронов определяется отношением амплитуд поля  $E_0$  к характерному плазменному полю  $E_p$  (I.1.4). С другой стороны, нетрудно показать, что для равновесных условий изменение  $\Delta N_e$  - электронной концентрации связано с  $\Delta T_e$  соотношением

$$\frac{\Delta N_e}{N_{e0}} = \left[ \left( [NO^+] / N_{e0} \right) \left( 1 + \frac{\Delta T_e}{T_{e0}} \right)^{\gamma_1} + \left( [O_2^+] / N_{e0} \right) \left( 1 + \frac{\Delta T_e}{T_{e0}} \right)^{\gamma_2} \right]^{1/2} - 1,$$

где  $[NO^+]$  и  $[O_2^+]$  - концентрации основных (преобладающих) положительных ионов в Е-области,  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  - показатели температурной зависимости соответствующих этим ионам коэффициентов диссоциативной рекомбинации. При малых возмущениях  $\Delta N_e / N_{e0}$  для приближенной

оценки можно воспользоваться также более простым выражением [7]

$$\frac{\Delta N_e}{N_{e0}} = \left( \frac{\gamma}{2} \right) \frac{\Delta T_e}{T_{e0}}, \quad (2.5.1)$$

где  $\gamma = 0,5 - 1$ . В нашем случае значение  $(E_0 / E_p)^2$  для дневной области E составляет с учетом поглощения радиоволн в нижележащих слоях ( $-6$  дБ) около 0,05 и, следовательно, ожидаемое повышение  $\Delta N_e / N_{e0}$  согласно (2.5.1), находится в пределах  $1 + 3\%$ .

Для обнаружения таких небольших изменений  $\Delta N_e / N_{e0}$  в экспериментах была применена регистрация действующей высоты  $h'$  отражения пробных радиоволн, прошедших через всю E-область ионосферы. Дело в том, что на частотах  $f$ , близких к критической частоте  $f_o E$ , даже малые вариации концентрации электронов должны существенно сказываться на величине  $h'$ . Действительно, вклад в действующую высоту отражения для волны, прошедшей слой с параболической зависимостью  $N_e(h)$ , определяется, без учета влияния магнитного поля Земли, выражением [29]

$$y' = y_m \rho \ln[(\rho+1)/(\rho-1)], \quad (2.5.2)$$

где  $y_m$  - полутолщина слоя и  $\rho = f / f_o E$ .

Дифференцируя (2.5.2), получаем

$$\Delta h' = \frac{1}{2} y_m \rho \frac{\Delta N_e}{N_{e0}} \left( \frac{2\rho}{\rho^2-1} - \frac{\rho+1}{\rho-1} \right). \quad (2.5.3)$$

Как видно из (2.5.3), при  $\rho = 1,02 - 1,03$  и  $y_m = 20$  км изменения  $\Delta N_e / N_{e0} \sim 10^{-2}$  вызывает вариации  $\Delta h'$ , достигающие 4 - 6 км.

Эксперименты по нагреву E-области были проведены в сентябре 1979 г. в околополуденные часы, когда  $f_o E = 3,4 - 3,5$  МГц. Импульсный передатчик пробных волн работал на частоте  $f = 3,55$  МГц, возмущающий передатчик излучал необыкновенную компоненту на частоте 4,6 МГц. Нагрев велся серией последовательных сеансов продолжительностью по 5 мин каждый с четырёхминутными паузами между ними. (Заметим, в этой связи, что время переходных процессов  $\tau = (\alpha N_e)^{-1}$ , где  $\alpha$  - эффективный коэффициент рекомбинации, составляет для дневной E-области  $\sim 0,5$  мин).

В табл. 2.5.1 приведены результаты эксперимента 28.09.79 г. и указаны время начала сеансов, значения  $f_o E$ , изменения  $\Delta h'$  (усредненные

за соответствующий сеанс нагрева) и рассчитанное по соотношению (2.5.1) отношение  $\Delta N_e / N_{e0}$ .

Т а б л и ц а 2.5.1

Время	: 11.48	: 11.57	: 12.06	: 12.15	: 12.24	: 12.33	: 12.42
$f_o E$ , МГц	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,45	3,4
$\Delta h'$ , км	5,3	5,7	3,3	1,7	6,2	5	3,3
$\frac{\Delta N_e}{N_{e0}}$ , %	0,8	0,9	0,5	0,3	0,9	2,4	1,6

Как видно из таблицы, в эксперименте уверенно зарегистрирован эффект возрастания действующей высоты<sup>+) . Полученные значения  $\Delta N_e / N_{e0}$  по порядку величины соответствуют ожидаемым теоретическим оценкам. Отметим, однако, довольно значительный разброс  $\Delta N_e / N_{e0}$  при переходе от одного сеанса к другому. Его можно объяснить, в первую очередь, большими ошибками определения  $f_o E$  из ионограмм станции АМС. Кроме того, возможны вариации  $h'$ , вызванные изменениями в F-области ионосферы. Для более точного анализа эффектов нагрева необходимо также учесть магнитного поля Земли.</sup>

Дальнейшие эксперименты по исследованию параметров ОВ нижней ионосферы с помощью регистрации доплеровского смещения частоты пробной волны проводились одновременно с описанными в первой главе. При включении ВП (на обыкновенной и необыкновенной поляризациях) наблюдалось увеличение доплеровского смещения частоты пробных волн в среднем на 0,1 Гц. При его выключении наблюдалось уменьшение доплеровского смещения частоты примерно на такую же величину. Эти изменения наиболее отчетливо проявлялись в первые 30 с после включения и выключения ВП. В табл. 2.5.2 приведены усредненные по 11 последовательным сеансам наблюдений величины изменений доплеровской частоты  $\Delta f$  пробной волны при включении и выключении ВП. Наиболее вероятной причиной изменений  $\Delta f$  представляется увеличение  $N_e$  в E-слое, возникающее при работе ВП на частоте  $f_o > f_o E$ . Об увеличении  $N_e$  свидетельствует также тот факт, что величина  $\Delta f$  не зависит от поляризации возмущающей волны. Оценка времени изменения  $N_e$  в E-слое ионосферы [7] -

<sup>+) Возрастание действующей высоты отражения пробной волны при работе возмущающего передатчика регистрировалось и в другие дни, когда проводился эксперимент.</sup>



20 - 50 с - хорошо совпадает с полученным экспериментальным значением.

Т а б л и ц а 2.5.2

Дата	Частота, МГц	$\Delta f$ , Гц		Поляризация волны КВ передатчика
		Включение	Выключение	
11.05.82	6,17	$n = 15$	$n = 17$	Необыкновенная
		$\Delta f = 0,15$	$\Delta f = -0,1$	
12.05.82	6,05	$n = 11$	$n = 11$	Необыкновенная
		$\Delta f = 0,12$	$\Delta f = -0,14$	Обыкновенная
		$n = 11$	$n = 11$	
13.05.82	6,97	$\Delta f = 0,13$	$\Delta f = -0,1$	Необыкновенная
		$n = 11$	$n = 11$	
		$\Delta f = 0,06$	$\Delta f = -0,1$	Обыкновенная
		$n = 11$	$n = 11$	
		$\Delta f = 0,06$	$\Delta f = -0,08$	

Из известного выражения величины доплеровского смещения частоты  $\frac{z}{z(\epsilon=0)}$

[20]  $f_g = -2 \frac{f}{c} \int_0^z \frac{\partial n}{\partial t} dz$  для показателя преломления в виде  $n = (1 - f_p^2(z,t)/f^2)^{1/2}$  с использованием параболической модели Е-слоя  $f_p^2(z,t) = f_0^2 \left(1 - \frac{z^2}{y_m^2}\right) + \Delta f_0^2 \left(1 - \frac{z^2}{y_m^2}\right) F(t)$ , где  $f_0$  -

плазменная частота в максимуме слоя,  $z$  - высота, отсчитываемая от максимума слоя,  $y_m$  - полутолщина слоя,  $F(t)$  - временная зависимость  $N_e$ ,  $\Delta f_0^2$  - изменение  $f_0^2$  из-за нагрева, получим

$$f_g = \frac{f}{c} \frac{\Delta N_e}{N_{e0}} y_m \frac{\partial F(t)}{\partial t} \left( \frac{a^2+1}{2a} \ln \left| \frac{1+a}{1-a} \right| - 1 \right), \quad (2.5.4)$$

где  $a^2 = f_0^2 / f^2$ . Из (2.5.4) можно выразить изменение  $\frac{\Delta N_e}{N_{e0}}$ :

$$\frac{\Delta N_e}{N_{e0}} = \left[ \frac{\partial F(t)}{\partial t} \frac{y_m}{c} \frac{f}{f_g} \left( \frac{a^2+1}{2a} \ln \left| \frac{1+a}{1-a} \right| - 1 \right) \right]^{-1}. \quad (2.5.5)$$

Задавая  $F(t) = 1 - \exp(-t/\tau)$  и подставляя в (2.5.5)  $f = 6 - 7$  МГц,  $f_0 = 3$  МГц,  $f_g = 0,1$  Гц,  $h_m = 30$  км при  $t = \tau = 30$  с, получаем  $\Delta N_e / N_{e0} = 5 \cdot 10^{-2}$ .

Найденное значение  $\Delta N_e / N_{e0}$  при нагреве E-слоя ионосферы мощными радиоволнами ВП с  $P_3 = P \times G \approx 20$  МВт хорошо согласуется с результатами работы [30]. Следовательно, доплеровское смещение частоты  $\Delta f \approx 0,1 + 0,17$  Гц, наблюдаемое при воздействии на ионосферную плазму мощным КВ излучением с  $P_3 \approx 20$  МВт, хорошо объясняется увеличением  $N_e$  в E-слое. Не так давно появилось сообщение (см.31) о наблюдении линзовых эффектов при зондировании области возмущения с  $\Delta N_e / N_{e0} > 0$  в E-слое, проявившихся в виде фокусировок пробных волн.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа приведенных в части II экспериментальных результатов можно сделать следующие выводы:

- при воздействии мощного КВ радиоизлучения обыкновенной и необыкновенной поляризаций эффективной мощности  $P_3 \approx 20$  МВт и  $P_3 \approx 50$  МВт на верхнюю ионосферу за время 7 - 8 минут формируется крупномасштабная область пониженной концентрации электронов с относительными изменениями  $\Delta N_e / N_{e0} \approx 5 \cdot 10^{-2}$  и  $\Delta N_e / N_{e0} \approx 1 \cdot 10^{-1}$  соответственно и вертикальными размерами  $L_B$  не менее 20 - 30 км,
- возбуждается целый спектр неоднородностей электронной концентрации различных масштабов, которые анизотропны, и степень их анизотропии увеличивается с уменьшением масштаба неоднородности,
- исследования влияния ОВ на амплитуду пробных радиоволн при ВЗ и НЗ на трассах различной протяженности подтвердили теоретические представления о возможности фокусировки радиоволн областью пониженной электронной концентрации, причём на коротких трассах ( $D \approx 200 - 300$  км) эффект фокусировки маскируется рассеянием на мелкомасштабных и среднемасштабных неоднородностях,
- экспериментально обнаружено увеличение МЧ на I - 5% трассы НЗ вследствие дополнительной рефракции пробных радиоволн на крупномасштабной области возмущения,
- существование в ОВ неоднородностей различных масштабов приводит к изменению статистических характеристик пробных радиоволн, в частности, происходит значительное уменьшение (в 5 раз и более) временного радиуса корреляции и уширение спектра сигнала, изменяется

- характер амплитудных распределений и др.,  
- в нижней ионосфере на высотах 100 - 200 км вследствие уменьшения коэффициента диссоциативной рекомбинации имеет место увеличение электронной концентрации на 1 - 5% при мощности нагревного стэнда  $P_3 \approx 20$  МВт.

### Л и т е р а т у р а

1. Белов И.Ф., Бычков В.В., Гетманцев Г.Г., Митяков Н.А., Пашкова Л.Р. Экспериментальный комплекс "Сура" для исследования искусственных возмущений ионосферы. Препринт № 167. Горький: НИРФИ, 1983.
2. Гуревич А.В., Шварцбург А.Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. - М.: Наука, 1973.
3. Бенедиктов Е.А., Горохов Н.А., Игнатьев Д.А., Матюгин С.Н., Митяхин Д.В. - Изв. вузов - Радиофизика, 1980, т. 23, № 4, с. 502.
4. Бенедиктов Е.А., Горохов Н.А., Игнатьев Д.А., Матюгин С.Н., Митяхин Д.В. Тезисы докладов XIII Всесоюзной конференции по распространению радиоволн. - М.: Наука, 1981, т. I, с. 182.
5. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Гетманцев Г.Г., Ерухимов Л.М., Зуйков Н.А., Коробков Д.С., Митяков Н.А., Комраков Г.П., Рапопорт В.О., Трахтенгерц В.Д., Фролов В.Л. - Изв. вузов - Радиофизика, 1975, т. 18, № 4, с. 516.
6. Васьков В.В., Гуревич А.В. - В сб.: Тепловые нелинейные явления в плазме. - Горький: ИПФ АН СССР, 1979, с. 81.
7. Игнатьев Д.А. - Изв. вузов - Радиофизика, 1978, т. 21, № 3, с. 352.
8. Васьков В.В., Гуревич А.В. - Геомагнетизм и аэрономия, 1976, т. 16, № 6, с. III2.
9. Ерухимов Л.М., Метелёв С.А., Митякова Э.Е., Мясников Е.Н., Рахлин А.В., Урядов В.П., Фролов В.Л. - В сб.: Тепловые нелинейные явления в плазме. - Горький: ИПФ АН СССР, 1979, с. 7.
10. Альперт Я.Л. Распространение электромагнитных волн в ионосфере. - М.: Наука, 1973.
11. Поляков В.М., Щепкин Л.А., Казимировский Э.С., Козоуров В.Д., Ионосферные процессы. - Новосибирск: Наука, 1968.
12. Гершман Б.Н. Динамика ионосферной плазмы. - М.: Наука, 1974.
13. Толмачева А.В. Диссертация. Горький, 1980.
14. Благовещенский Д.В. Распространение декаметровых радиоволн в высших широтах. - М.: Наука, 1981.

15. Ерухимов Л.М., Митяков Н.А., Мясников Е.Н., Фролов В.Л. Тезисы XIII Всесоюзной конференции по распространению радиоволн. Горький, 1981, с. 132.
16. Utlaut W.F. - Proc.IEEE, 1975, v. 63, № 7, p. 1022.
17. Ерухимов Л.М., Митякова Э.Е., Мясников Е.Н. и др. - Изв. вузов - Радиофизика, 1977, т. 20, № 12, с. 1814 - 1820.
18. Васьяков В.В., Гуревич А.В. В сб.: Тепловые нелинейные явления в плазме, Горький, 1979, с.81 - 138.
19. Ерухимов Л.М., Коровин А.В., Митяков Н.А. и др. - Изв. вузов - Радиофизика, 1981, т. 25, с.1360.
20. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. - М.: Физматгиз, 1960.
21. Мирохин А.М., Кольцов В.В., Лобачевский Л.А. - В сб.: Распространение радиоволн в ионосфере. - М.: ИЗМИРАН, 1983.
22. Погода Э.В. - В кн.: Экспериментальные методы радиозондирования ионосферы. - М.: ИЗМИРАН, 1981, с. 145 - 151.
23. Ходжа-Ахмедов Ч.Д. - В сб.: Наклонное зондирование ионосферы. - Ленинград, 1972, в. I, с. 99 - III.
24. Корка Н., Miller H.G. - Radio Sci., 3 (New Series), № 1, 43 -51, 1968.
25. Бахметьева Н.В., Игнатьев Д.А., Петрухина В.И., Савельев С.М. - Геомагнетизм и аэрномия, 1982, т. 22, № 6, с. 924 - 929.
26. Игнатьев Д.А., Матюгин С.Н., Митихин Д.В. - В сб.: Распространение радиоволн в возмущенной ионосфере. - Апатиты, 1983, с. 133-146.
27. Бенедиктов Е.А., Горохов Н.А., Игнатьев Д.А., Матюгин С.Н., Митихин Д.В. Тезисы XIII Всесоюзной конференции по распространению радиоволн. - М.: Наука, 1981, ч. I, с. 182.
28. Всехсвятская И.С. Статистические свойства сигналов, отраженных от ионосферы. - М.: Наука, 1973.
29. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. - М.: "Мир", 1973.
30. Бенедиктов Е.А., Гетманцев Г.Г., Эвзин В.А., Игнатьев Д.А.- Геомагнетизм и аэрномия, 1980, № 5, с. 955.
31. Иванов В.А., Игнатьев Д.А., Матюгин С.Н., Фролов В.А., Шавин П.Б., Шумаев В.В. Тезисы докладов XIV Всесоюзной конференции по распространению радиоволн. - М.: Наука, 1984, т. I, с. 127.

Дата поступления статьи

30 октября 1984 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
ВВЕДЕНИЕ . . . . .	3
1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИСКУССТВЕННОЙ ОБЛАСТИ ВОЗМУЩЕНИЯ F-СЛОЯ ИОНОСФЕРЫ . . . . .	6
2. ИССЛЕДОВАНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ СРЕДНЕМАСШТАБНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ В ОБ . . . . .	13
2.1. Поперечные масштабы . . . . .	14
2.2. Продольные масштабы . . . . .	14
2.3. Степень анизотропии неоднородностей . . . . .	15
2.4. Отклонение электронной концентрации . . . . .	16
2.5. Времена развития искусственных неоднородностей . . . . .	17
2.6. Вертикальные размеры ОБ . . . . .	18
2.7. Горизонтальные размеры ОБ . . . . .	19
3. ИЗМЕНЕНИЕ ДИСТАНЦИОННО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛОВ НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПРИ ИСКУССТВЕННОМ ВОЗМУЩЕНИИ F-СЛОЯ ИОНОСФЕРЫ . . . . .	22
3.1. Методика проведения эксперимента . . . . .	22
3.2. Результаты наблюдений . . . . .	23
3.3. Модельный эксперимент . . . . .	23
4. ВЛИЯНИЕ ОБЛАСТИ ВОЗМУЩЕНИЯ И ЕЁ НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРЫ НА АМПЛИТУДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КВ СИГНАЛОВ НА ТРАССАХ РАЗЛИЧНОЙ ПРОТЯЖЁННОСТИ . . . . .	27
4.1. Азимутальная фокусировка пробных волн, проходящих через ОБ, на трассах НЗ длиной около 3000 км . . . . .	27
4.2. Изменения статистических характеристик пробных радиоволн при наклонном зондировании ОБ на коротких трассах . . . . .	32
4.3. Определение эффективной скорости перемещения искусственного возмущения в F-слое ионосферы . . . . .	37
5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИ ВОЗМУЩЕНИИ E-СЛОЯ ИОНОСФЕРЫ . . . . .	39
ЗАКЛЮЧЕНИЕ . . . . .	43
ЛИТЕРАТУРА . . . . .	44