

Министерство высшего и среднего специального образования  
РСФСР

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

П р е п р и н т № 233

О ДИНАМИКЕ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ ИСКУССТВЕННЫХ  
ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ

Беленов А.Ф.  
Ерухимов Л.М.  
Зозин В.А.  
Насыров А.М.  
Стрекалов В.А.  
Фролов В.Л.

Г о р ь к и й 1 9 8 7

Беленов А.Ф., Ерухимов Л.М., Зозин В.А.,  
Насыров А.М., Стрекалов В.А., Фролов В.Л.

О ДИНАМИКЕ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ ИСКУССТВЕННЫХ  
ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ. Горький,  
Препринт № 233/НИРФИ, 1987. - 26 с.

УДК 551.510.535

Представлены результаты экспериментальных исследований динамики развития и релаксации искусственных мелкомасштабных неоднородностей плазмы F-слоя ионосферы при воздействии на нее короткими импульсами мощного КВ излучения. Показано, что развитие неоднородностей начинается спустя некоторое время  $t_0 \approx 50-200$  мс (в зависимости от их поперечного по отношению к внешнему магнитному полю  $H_0$  масштаба  $l_{\perp}$ ) и может продолжаться и после выключения волны накачки. При сравнении динамики развития искусственных неоднородностей различного масштаба установлено, что в спектре флуктуаций плотности плазмы в первые несколько секунд после начала воздействия наблюдается максимум спектральной интенсивности в области  $l_{\perp} \approx 3$  м.

В последнее время в экспериментах по воздействию мощным радиоизлучением на ионосферную плазму все чаще стали использоваться режимы с короткими импульсами волны накачки (ВН). Это, в первую очередь, связано со стремлением при высоких мощностях импульсного излучения затруднить генерацию крупномасштабных долго релаксирующих изменений характеристик фоновой плазмы, концентрируя энергию ВН как бы только на возбуждении искусственных мелкомасштабных неоднородностей. Кроме того, короткие импульсы ВН часто также можно использовать в качестве зондирующего возмущенную область (ВО) ионосферы: излучения после предварительного ее разогрева в течение достаточно длительного времени. В связи с этим встал вопрос об исследовании свойств искусственной ионосферной турбулентности (ИИТ) при ее возбуждении импульсами ВН, когда длительность нагрева оказывается меньше характерного времени установления стационарного состояния ИИТ.

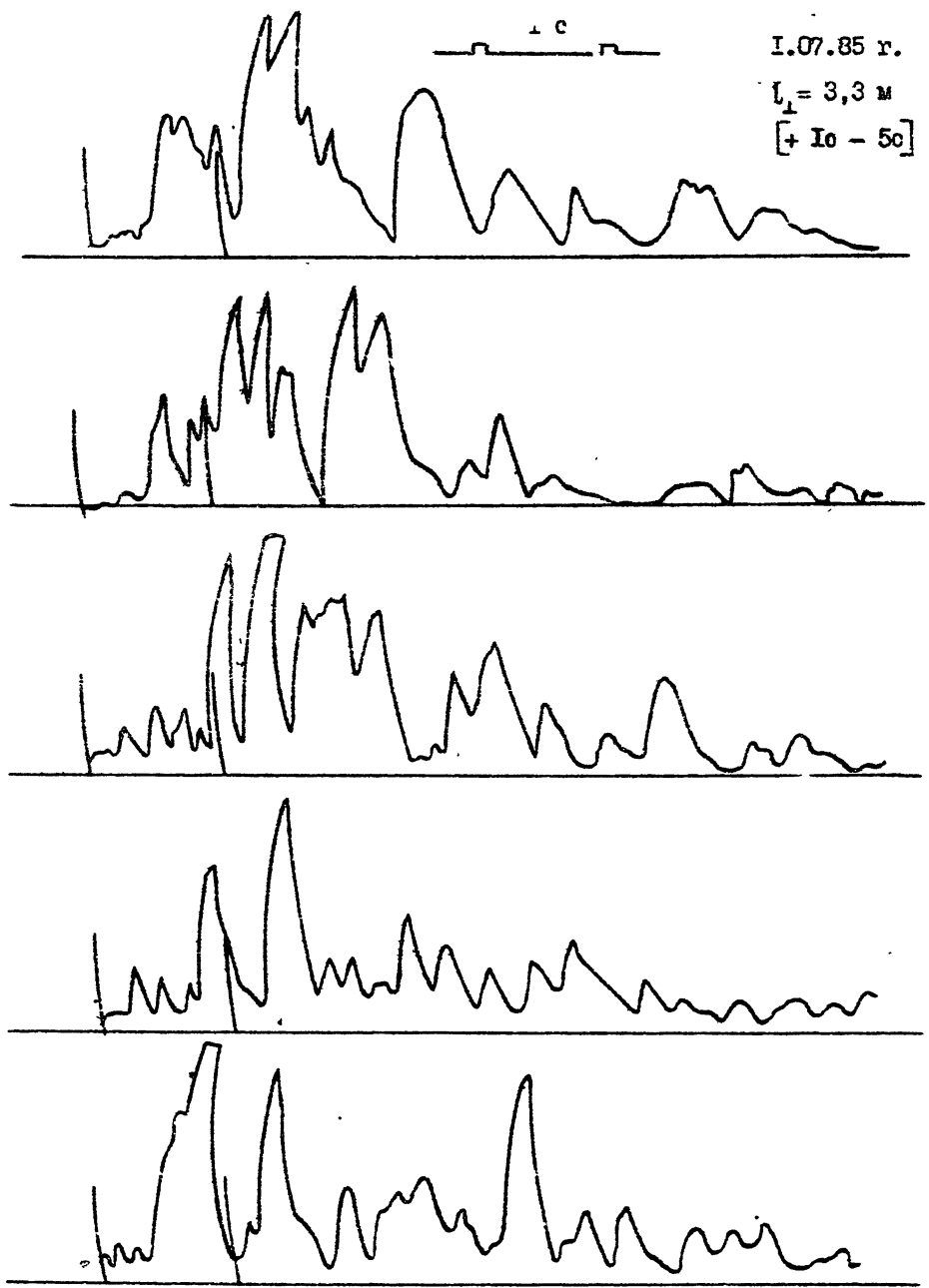
В настоящей работе проводится обсуждение экспериментальных результатов, которые были получены на нагревном стенде "Сура" в 1985-1986 гг. при воздействии на F - слой ионосферы излучением мощности  $P_3 = 150 \text{ МВт}$  ( $f_{ВН} = 4,785 \text{ МГц}$ ). Диагностика искусственных ионосферных неоднородностей (ИИН) с масштабами  $h' = 2,5 - 9 \text{ м}$  осуществлялась методом ракурсного рассеяния радиоволн КВ и УКВ диапазонов. Необходимо отметить, что свойства ИИН в значительной степени оказываются зависящими от режима включения ВН - длительности ее излучения и периода следования посылок. Поэтому по возможности в работе приводятся данные в сравнении с результатами экспериментов при длительном непрерывном нагреве ионосферной плазмы (далее режим "несущая"), которые служат своеобразной калибровкой для сопоставления различных серий измерений. На всех приводимых в работе графиках экспериментальные точки являются результатом

Δ c

1.07.85 г.

$L_{\perp} = 3,3 \text{ м}$

[+ I<sub>0</sub> - 50]



Вкл.

Выкл.

Р и с. I

усреднения сигнала по пяти последовательным циклам включения ВН, пример которых приведен на рис.1

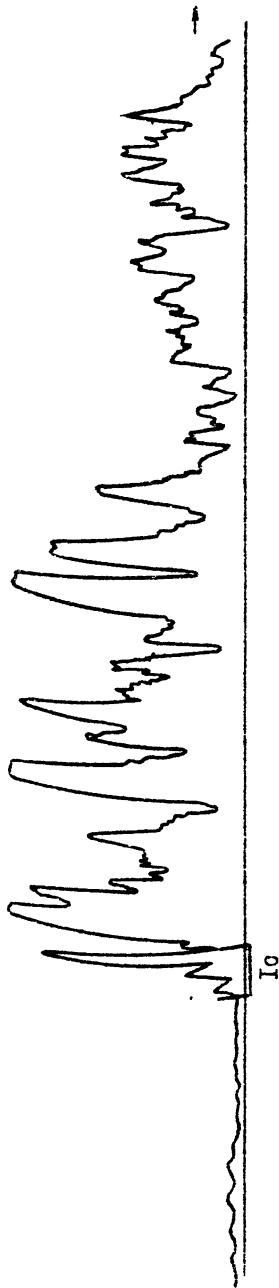
Ниже мы рассмотрим особенности и динамику развития ИИН различных масштабов при коротких импульсах излучения ВН.

I. Одним из основных вопросов, на который прежде всего необходимо ответить, является вопрос о существовании времени задержки начала развития искусственных неоднородностей относительно момента включения ВН. О такой задержке для  $l_{\perp} \approx 3\text{ м}$  с  $t_0 \approx 0,3-0,5\text{ с}$  ( $P_0 = 20\text{ МВт}$ ) упоминалось еще в работе /1/, позднее (в /2/) для  $P_0 = 150\text{ МВт}$  было определено, что  $t_0 \approx 0,05\text{ с}$ . Однако ввиду естественной ограниченности величины превышения амплитуды принимаемого сигнала над уровнем помех и шумами приемной аппаратуры окончательное решение вопроса о существовании и значении  $t_0$  оставалось открытым.

Обратимся к рис.1, где для  $l_{\perp} = 3,3\text{ м}$  приведены примеры измерений амплитуды рассеянного сигнала при режиме излучения ВН 1с вкл., 5 с выкл. ( $[+1\text{с} - 5\text{с}]$ ). Хорошо видно, что, несмотря на значительный остаточный уровень неоднородностей от предыдущего цикла нагрева, рост рассеянного сигнала (интенсивности ИИН) начинается всегда спустя некоторое время после включения ВН. В аналогичной ситуации наличие времени задержки  $t_0$  было получено и для  $l_{\perp} \approx 6,9\text{ м}$ , пример регистрации которых приведен на рис.2. Обработка экспериментальных данных показала, что при  $P_0 = 150\text{ МВт}$  величина  $t_0$  составляет  $\sim 0,05 - 0,1\text{ с}$  для  $l_{\perp} \approx 3\text{ м}$  и  $\sim 0,1 - 0,2\text{ с}$  для  $l_{\perp} \approx 7\text{ м}$ .

Приведенные выше данные прямо указывают, что рост флуктуаций плотности плазмы начинается не одновременно с включением ВН, а спустя некоторое время  $t_0$ , причем получено, что значение  $t_0$  возрастает с ростом  $l_{\perp}$ . Согласно оценкам, это время по порядку величины соответствует времени перераспределения концентрации электронов вдоль силовых линий магнитного поля  $\vec{H}_0: t_0 \approx \tau_{e\parallel}$  ( $\tau_{e\parallel} \approx l_{\parallel}^2 / 4D_{e\parallel}$ , где  $l_{\parallel} =$

5



21.08.86 г.

$l_{\perp} = 6,9$  м  
[+  $I_0 - 59c$ ]

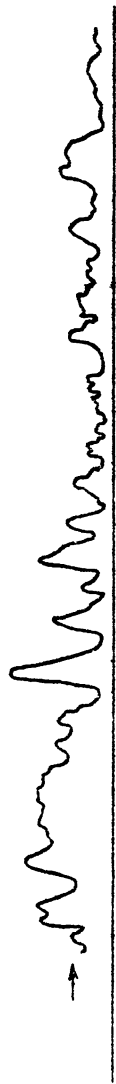


Рис. 2

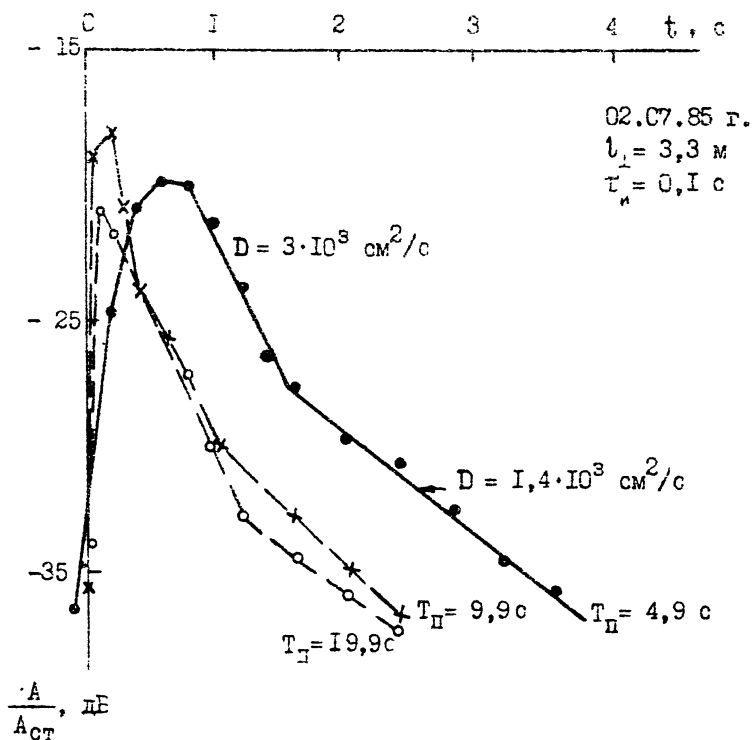
масштаб неоднородности  $T_e$  или  $N_e$  вдоль  $\vec{H}_0$ ), а ионов - поперек  $\vec{H}_0$ :  $t_0 \approx \tau_{i\perp}$  ( $\tau_{i\perp} \approx l_{\perp}^2/4D_{i\perp}$ ;  $l_{\perp}$  - масштаб неоднородности поперек  $H_0$ ). Последнее может указывать на униполярный характер термодиффузии плазмы на первом этапе ее расслоения.

2. Рассмотрим на некоторых примерах характер развития ИИН и их релаксации для  $l_{\perp} \approx 3$  м в зависимости от режима нагрева ионосферной плазмы. На рис.3 приведено изменение амплитуды рассеянных сигналов для длительности излучения ВЧ  $\tau_{и} = 0,1$  с при различной скважности посылок.\*) Можно отметить несколько характерных особенностей зависимости  $A(t)$ , которые отвечают динамике искусственных неоднородностей. Во-первых, развитие неоднородностей продолжается еще в течение некоторого времени после окончания воздействия, причем для длительности паузы  $T_{п} = 4,9$  с по сравнению с  $T_{п} = 9,9$  с и  $19,9$  с это время заметно увеличивается от  $0,2$  с до  $0,6$  с. Кроме того, с уменьшением  $T_{п}$  наблюдается уменьшение скорости роста неоднородностей, так что в конечном итоге максимальная амплитуда рассеянного сигнала изменяется довольно слабо. Во-вторых, на стадии распада неоднородностей (уменьшения интенсивности рассеянного сигнала) для всех  $T_{п}$ , как правило, через  $\Delta t = 1$  с имеет место резкое замедление скорости их релаксации приблизительно в 2-3 раза, причем скорость более медленного расплывания соответствует коэффициенту амбиполярной диффузии с  $D \approx 2D_{e\perp} \approx 1,5 \cdot 10^3 \frac{\text{см}^2}{\text{с}}$ , вычисленного для условий проведения эксперимента.

---

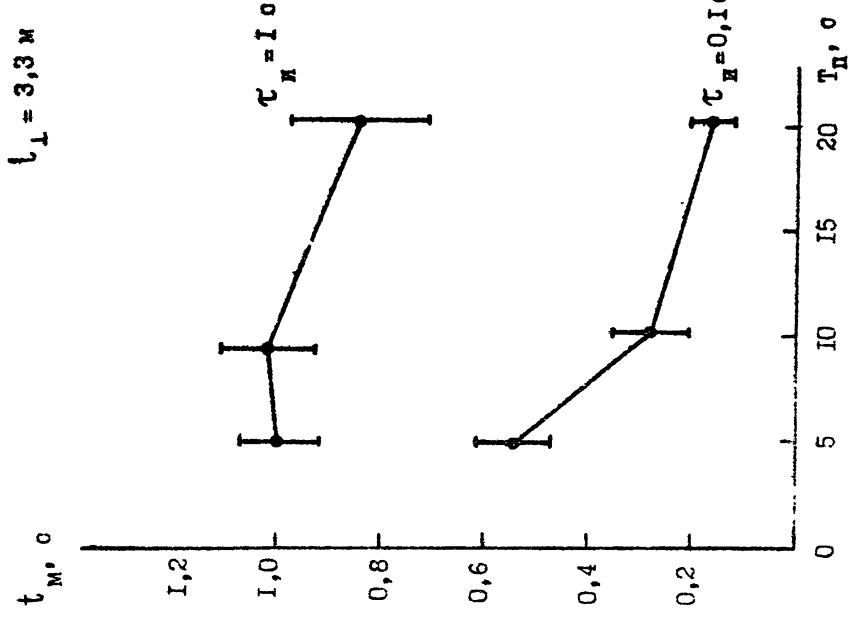
\*) Здесь и далее  $t = 0$  соответствует времени окончания импульса ВЧ. Амплитуда сигнала дана по отношению к его стационарному уровню, определяемому по соседним сеансам наблюдений при достаточно длительном воздействии на ионосферу.

Отмеченные особенности динамики ИИН можно хорошо видеть и на рис.4 (кривая [+Ic - 9c]). Однако они отсутствуют в случае достижения мелкомаштабной турбулентности уровня своего полного развития (кривая "нес", рис,4): релаксация после длительного нагрева начинается сразу по окончании воздействия и имеет постоянную скорость, соответствующую  $D = 2D_{el}$ . На рис.4 можно отметить и некоторый промежуточный случай (см.кривую [+Ic - 5c]), когда за Ic импульса нагрева интенсивность рассеяния успевает достигнуть своего стационарного уровня, но хотя релаксация и начинается сразу после выключения ВН, однако все еще сохраняется ее быстрая фаза.

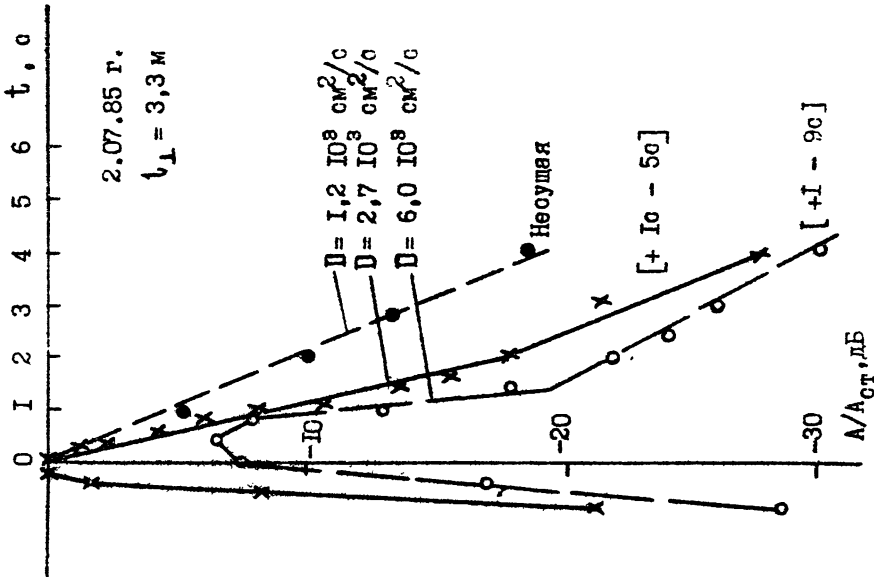


Р и с. 3





Р и с. 5



Р и с. 4

На рис.5 в зависимости от величины паузы между импульсами нагрева для двух их длительностей  $\tau_{и} = 0,1$  и  $1с$  приведены результаты измерения времени нарастания амплитуды рассеянного сигнала до своего максимального значения ( $t_m$ ) с момента включения ВН. Видно, что для  $\tau_{и} = 1с$  при всех  $T_n$  развитие неоднородностей успевает закончиться за время воздействия, имея возможно более высокий темп роста для больших  $T_n$ .

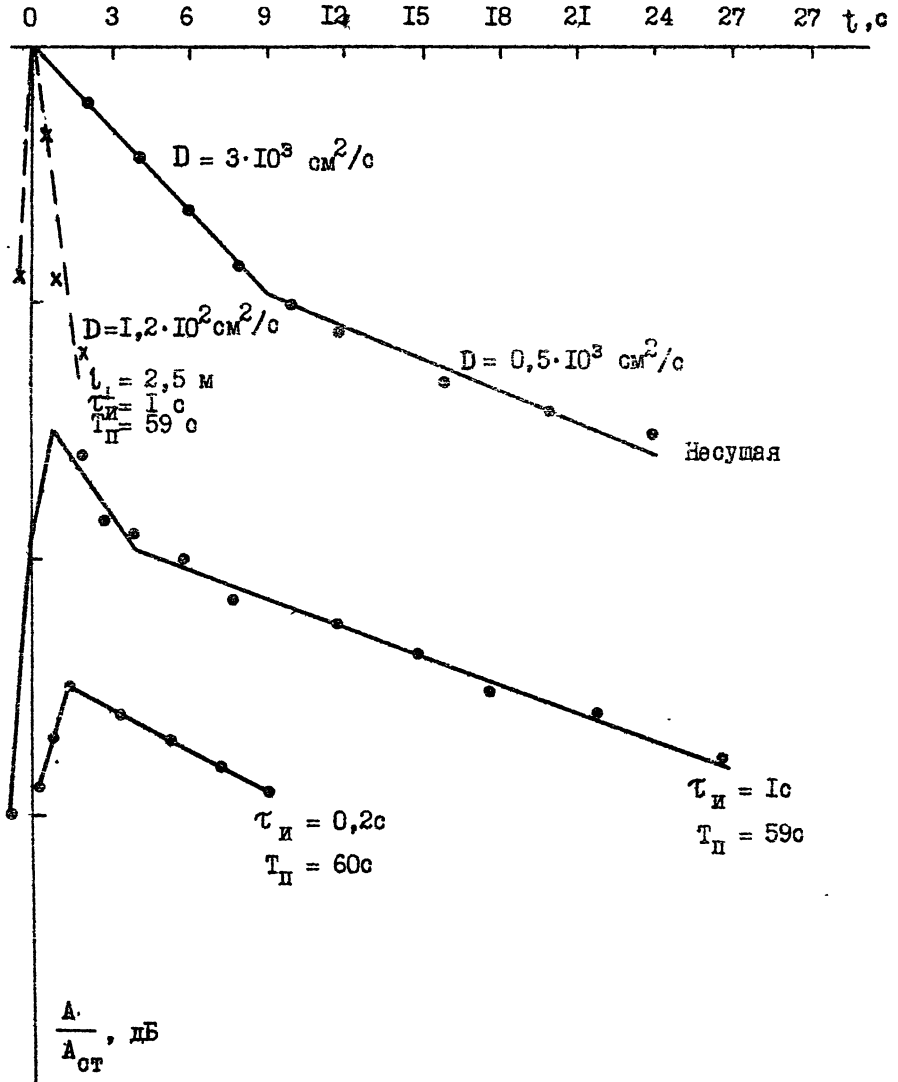
Иная ситуация наблюдается при  $\tau_{и} = 0,1с$ , где, как уже указывалось выше (см.рис.3), уровень неоднородностей более чем на 15 дБ ниже стационарного. Здесь с уменьшением длительности паузы  $T_n$  (особенно при  $T_n < 10с$ ) времена  $t_m$  резко возрастают, превышая в несколько раз  $\tau_{и}$ , что отвечает уменьшению скорости роста неоднородностей.

Последнее подтверждает вывод о том, что динамика развития ИИН в значительной степени может зависеть от их начального уровня, а возможно - и от всей предистории воздействия на ионосферную плазму.

3. Рассмотрим особенности развития ИИН с  $h_{\perp} \approx 7-9$  м, результаты измерений которых представлены на рис.6, 7 (сплошные кривые). На этих же рисунках пунктиром приведены данные одновременных измерений динамики неоднородностей с  $h_{\perp} \approx 3$  м. Видно, что при длительных паузах между импульсами ВН ( $T_n = 59с$ , рис.6) интенсивность рассеяния оказывается ниже своего стационарного уровня приблизительно на 15 дБ для  $\tau_{и} = 1с$  и на 25 дБ для  $\tau_{и} \approx 0,2с$ . Однако для коротких пауз между импульсами нагрева ( $T_n = 9с$ , рис.7) неоднородности с  $h_{\perp} \approx 9м$  успевают развиваться уже практически полностью в течение  $\tau_{и} = 1$  с. С другой стороны, сравнивая рис.6 и 7, можно заметить, что если в случае  $T_n = 59с$  интенсивность рассеяния для  $h_{\perp} \approx 3$  м соответствует своему стационарному значению, то в случае

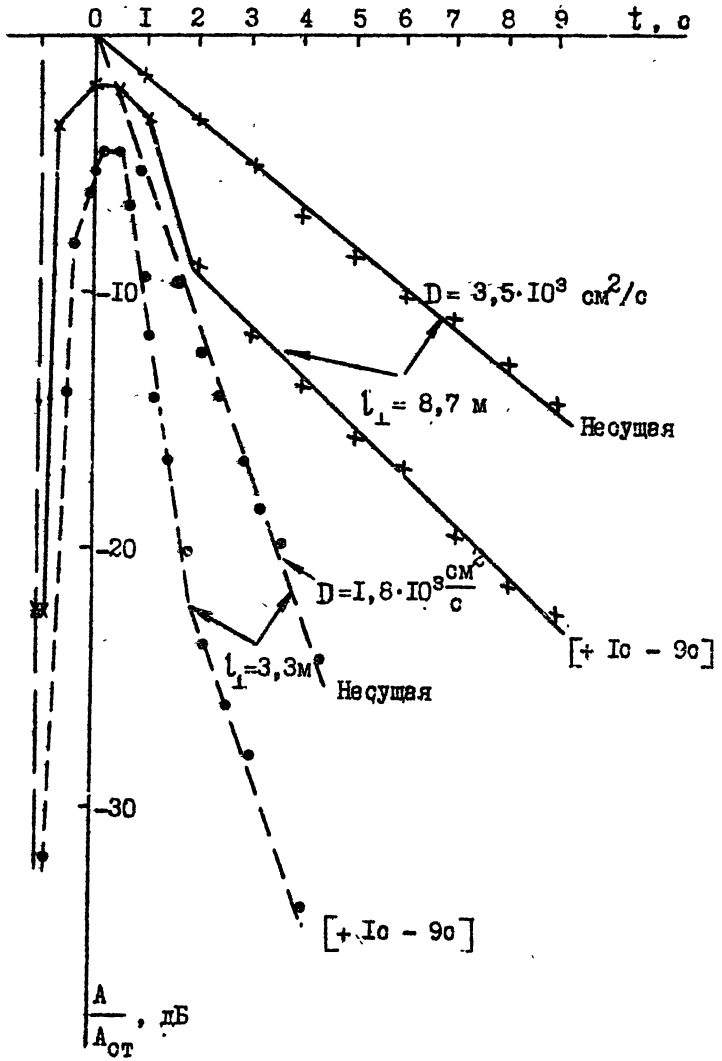
21.08.86 г.

$l_1 = 6,9$  м



Р и с. 6

2.07.85 г.



Р и с. 7

более коротких пауз она несколько снижается. Такая обратная зависимость соотношения интенсивностей искусственных неоднородностей различных масштабов является, по-видимому, фундаментальной характеристикой их генерации и ниже мы еще будем возвращаться к этому вопросу при анализе других экспериментальных данных.

После выключения ВН, как и в случае  $l_{\perp} \approx 3$  м, наблюдается рост интенсивности неоднородностей с  $l_{\perp} \approx 7-9$  м в течение времени  $\sim 1-2$  с. Далее уровень рассеяния уменьшается сначала несколько быстрее, чем при релаксации турбулентности со стационарного уровня, а затем — с тем же темпом. Однако здесь было получено, что при  $\tau_{\mu} = 0,2$  с, когда уровень ИИИИ был весьма незначи-

тельным, скорость релаксации сразу соответствовала скорости медленного расплывания стационарной турбулентности.

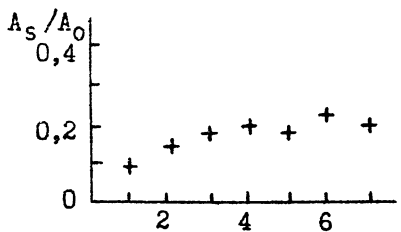
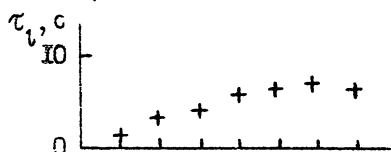
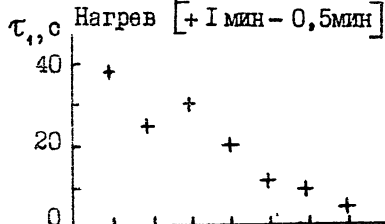
Полученные для  $l_{\perp} \approx 7-9$  м коэффициенты диффузии  $D \approx 3 \cdot 10^3 \frac{\text{см}^2}{\text{с}}$  оказываются приблизительно в 2 раза выше, чем для  $l_{\perp} \approx 3$  м. Это может быть объяснено, если предположить, что характерный размер  $l_{\perp}^*$  перелома зависимости времени релаксации  $\tau_2$  от  $l_{\perp}$  находится в области масштабов  $l_{\perp} \approx 7$  м. Последнее, согласно [1], может вполне иметь место для вечерних часов, когда проводились измерения.

Наблюдающееся увеличение скорости релаксации нестационарной турбулентности объясняет полученную ранее в [3] (см. рис.8) зависимость характерного вре-

12.04.76 г.

$l_{\perp} = 15$  м

Нагрев [+ 1 мин - 0,5 мин]



Р и с. 8

мени расплывания неоднородностей  $\tau_2$ , определяемого по времени падения амплитуды рассеянного сигнала в  $e$  раз, от номера цикла включения ВН ( $P_3 \approx 15$  МВт): с приближением интенсивности турбулентности к стационарному состоянию с одновременным уменьшением времени ее развития  $\tau_1$  и увеличением амплитуды рассеяния  $A_5$  времена релаксации  $\tau_2$  возрастали.

4. Обратимся теперь к исследованию спектральных характеристик мелкомасштабной турбулентности. Для длительной паузы между импульсами ВН (см.рис.6), которая наиболее соответствует условиям воздействия на невозмущенную ионосферную плазму, разница интенсивностей рассеяния для  $l_{\perp} \approx 3$  м и 7 м, взятая относительно их стационарных уровней, к концу первой секунды нагрева может составлять  $\sim 20$  дБ. Поскольку для стационара интенсивность неоднородностей с  $l_{\perp} \approx 7$  м только на 6-10 дБ превышает интенсивность флуктуаций концентраций с  $l_{\perp} \approx 3$  м, то из этого следует вывод, что на этих временах в области  $l_{\perp} \approx 3$  м наблюдается максимум в спектре флуктуаций плотности плазмы  $\Phi_N(x_{\perp})^*$ . Следуя данным, приведенным на рис.6, мы также должны заключить, что после окончания импульса ВН в течение I с инверсия в спектре  $\Phi_N(x_{\perp})$  исчезает, т.к. происходит быстрая релаксация неоднородностей с  $l_{\perp} \approx 3$  м при одновременном росте более крупных.

При коротких паузах  $T_{\Pi}$  (см.рис.7), когда значительное влияние на развитие ИИН оказывают эффекты последствия от предыдущих циклов нагрева, интенсивности неоднородностей обоих масштабов оказываются близки к стационарным, т.е. инверсия спектра не наблюдается. Однако и в этом случае интенсивность более мелкомасштабных не-

---

\* ) Напомним, что, согласно /4/, максимум  $\Phi_N(x_{\perp})$  в области  $l_{\perp} \approx 3$  м имеет место, по-видимому, только при достаточно больших уровнях мощности ВН -  $P_3 \approx 10$  МВт.

однородностей начинает уменьшаться заметно раньше, чем для  $l_{\perp} \approx 9$  м, причем вначале даже с более высоким темпом, чем скорость релаксации стационарной турбулентности.

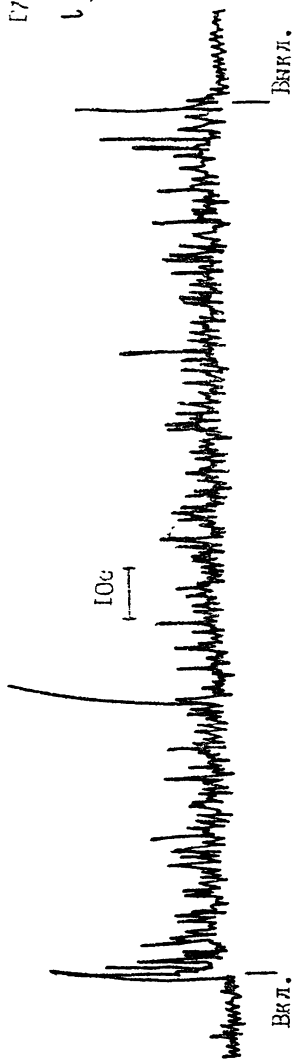
Из всего вышесказанного следует, что при импульсном режиме воздействия, когда удастся более детально проследить динамику образования мелкомасштабных ИИГ, не наблюдается каких-либо эффектов, указывающих на поддержание мелких неоднородностей за счет перекачки энергии от более крупных. Более того, в начальный момент, когда имеет место инверсия спектра  $\Phi_N(\omega_{\perp})$  в области масштабов  $l_{\perp} \approx 3-9$  м, наблюдается наоборот поддержание или даже некоторое усиление интенсивности флуктуаций больших масштабов во время исчезновения мелких, а возможно и за счет их энергии.

Одним из ключевых моментов при исследовании генерации искусственных мелкомасштабных неоднородностей является вопрос о характере роста их интенсивности во времени: присуще ли ей монотонное нарастание флуктуаций плотности плазмы, или в определенные моменты времени интенсивность некоторых масштабов может превышать уровень своего стационарного развития? В пользу последнего предположения говорит ряд экспериментальных фактов, на анализе которых мы и остановимся ниже.

На рис. 9 приведен один из сеансов измерения сигнала ракурсного рассеяния на частоте  $f = 85$  МГц ( $l_{\perp} \approx 1,7$  м) при мощности ВН  $P_3 \approx 100$  МВт /5/. Видно, что в первые секунды после включения ВН интенсивность рассеяния почти на 10 дБ превышает стационарный уровень рассеяния. Аналогичные результаты были получены и для  $l_{\perp} \approx 3$  м, где превышение обычно составляло  $\sim 3$  дБ. Отмечалось также, что частота флуктуаций сигнала внутри всплеска была ниже, чем в стационарном режиме, а сами всплески наблюдались

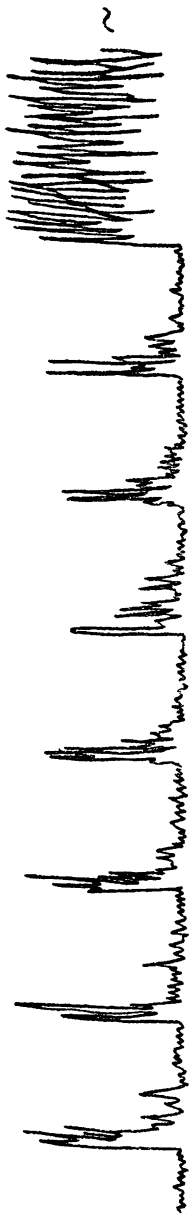
17.02.61 г.

$l_L = 1,7$  м



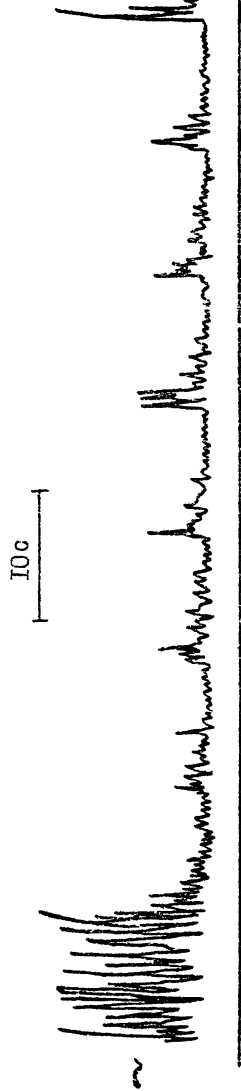
Вкл.

Р и с. 9



3.07.85 г.

$l_L = 3,3$  м



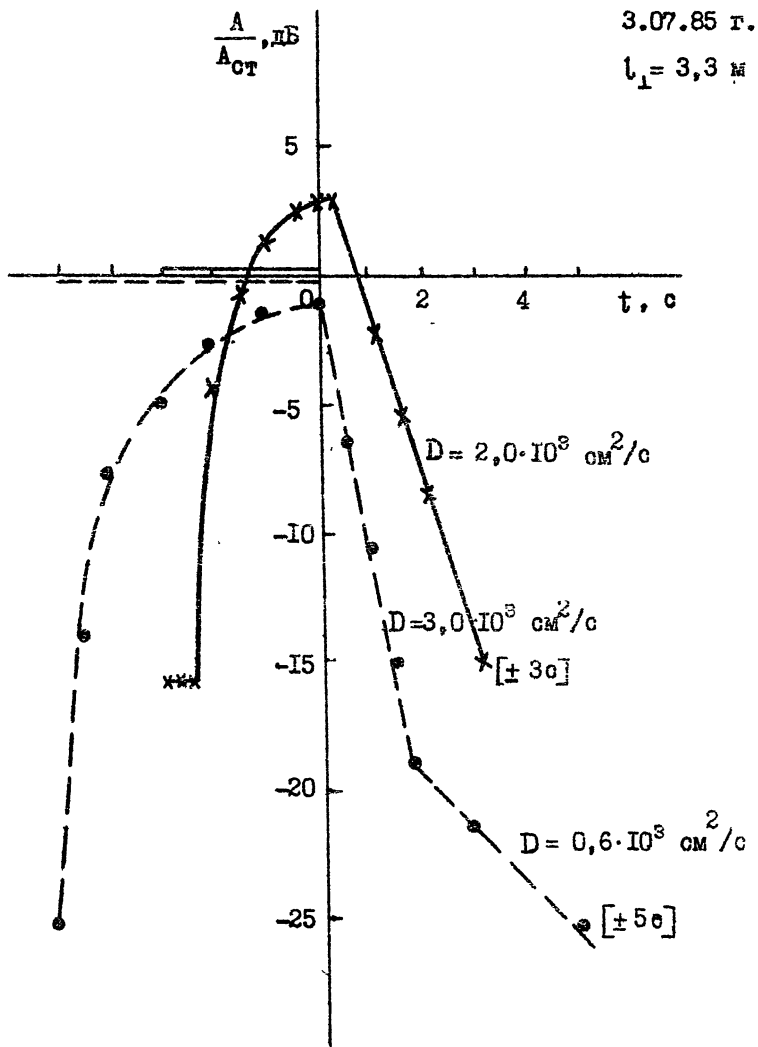
Р и с. 10



достаточно редко и только при эффективных мощностях нагревного передатчика, превышающих 30 МВт. Для более крупных неоднородностей ( $l_1 \approx 7$  м) этот эффект обнаружен не был.

Довольно редкая появляемость всплесков амплитуды рассеяния может быть связана с особенностями его формирования, когда интенсивность принимаемого сигнала определяется не только интенсивностью флуктуаций плотности плазмы, но и величиной объема рассеяния. При этом, если вначале, как будет показано ниже, сигнал определяется рассеянием на небольших локальных образованиях, а при полном своем развитии — всей ВО, то очевидно, что на стационаре интенсивность рассеяния вполне может иметь максимальную величину, а уменьшение амплитуды флуктуаций плотности плазмы будет даже в большей степени компенсироваться ростом объема рассеяния. Поэтому только в некоторых случаях, как на рис. 9, когда область формирования рассеяния по каким-либо причинам захватывает сразу, по-видимому, значительный объем ВО, мы наблюдаем всплески интенсивности принимаемого сигнала.

Второй пример, на котором здесь хотелось бы остановиться, связан с определенным влиянием ИИИ различных масштабов на формирование спектра искусственной турбулентности. На рис. 10 приведен пример регистрации уровня рассеянного сигнала, когда импульсный режим нагрева [+1с - 9с] чередовался с непрерывным излучением ВЧ. Хорошо видно, что интенсивность рассеяния при секундной накачке значительно выше до режима "несущая", чем после неё. Кроме того после окончания непрерывного нагрева ионосферы видно постепенное увеличение уровня принимаемого сигнала в течение первых 3-4 импульсов воздействия, однако полного его восстановления не наблюдается. Последнее также может являться следствием влияния и более крупномасштабных неоднородностей с



Р и с. II

$l_{\perp} \approx 100$  м на генерацию неоднородностей с  $l_{\perp} < 10$  м.

В качестве третьего примера рассмотрим некоторые результаты исследования генерации ИИИ с  $l_{\perp} \approx 3$  м при воздействии на ионосферную плазму мощным радиоизлучением с амплитудной модуляцией типа " Меандр " (рис. II). Видно, что при модуляции ВН в режиме  $\pm 3$  с интенсивность рассеяния оказывается почти в 2 раза выше своего стационарного значения, в то время как для режима  $\pm 5$  с она остается несколько ниже его. В других измерениях было получено, что переход от модуляции  $\pm 2,5$  с к  $\pm 1$  с также вызывал уменьшение амплитуды рассеянного сигнала, т.е. при режиме модуляции несущей  $\pm 2 \div 3$  с ( $F_M = 0,15 \div 0,25$  Гц) наблюдается наибольшая интенсивность рассеивающих неоднородностей с  $l_{\perp} \approx 3$  м. Но именно на этих частотах модуляции наблюдался нами "модуляционный провал" в интенсивности рассеяния на декаметровых неоднородностях /I/.

Таким образом, совокупность представленных выше экспериментальных данных свидетельствует о том, что интенсивность неоднородностей с  $l_{\perp} \approx 3$  м, возбуждаемых при уровне мощности ВН  $P_3 \approx 100$  МВт, уменьшается при развитии более крупномасштабной искусственной турбулентности.

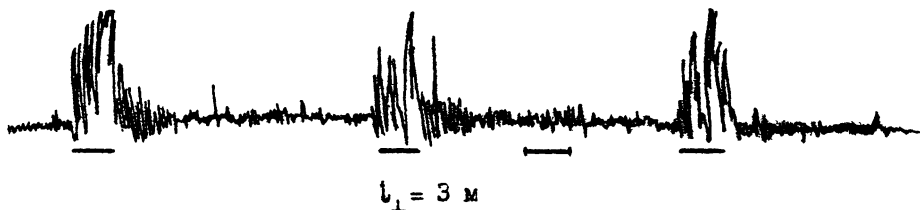
5. Сделаем в заключении несколько замечаний о некоторых характеристиках ракурсного рассеяния при импульсном нагреве ионосферной плазмы.

Было проведено сравнение ракурсного хода амплитуд рассеянных сигналов при импульсном и непрерывном излучении ВН, показавшее, что их отношение  $A_{и}/A_{нес}$  уменьшается с уменьшением интенсивности рассеяния или при выходе из ракурсной зоны. Из этого можно сделать два вывода. Во-первых, сохранение степени ракурсности говорит о том, что и при импульсном режиме воздействия рас-

сеяние происходит на достаточно сильно вытянутых неоднородностях. Во-вторых, на краях ВО (с понижением уровня мощности ВН по диаграмме направленности антенны нагревного стенда) неоднородности за время импульса излучения возбуждаются относительно несущей до меньшего уровня, чем в её центральной части. Последнее может свидетельствовать о более сильной зависимости от мощности ВН характерных времен развития ИИН, чем их интенсивности, что соответствует имеющимся экспериментальным данным /1/. Не исключено также и изменение характера развития турбулентности при уменьшении мощности излучения.

Второе, на что необходимо обратить внимание:—это на свойства флуктуаций рассеянного сигнала при импульсном излучении ВН, частота которых определяется размерами области рассеяния. Здесь можно отметить несколько характерных особенностей его поведения, прямо подтверждающих ранее сделанный вывод о генерации ИИН в начале в одной или нескольких локальных областях ВО. Это, во-первых, уменьшение частоты флуктуаций рассеянного сигнала при импульсном режиме возбуждения неоднородностей по сравнению с частотой при непрерывном излучении ВН, а также появление характерных доплеровских биений его амплитуды, один из примеров которых приведен на рис.12.

26.09.80 г.



Р и с. 12

В /7/ интерпретация такого рода рассеяния дана в рамках модели образования двух (или более) центров с сильной турбулентностью, быстро формирующейся в ВО, например, в результате увеличения потока энергии ВН за счет ее фокусировки на нескольких естественных крупномасштабных ионосферных неоднородностях. Такие "ядра" рассеяния на первом этапе развития ИИГ легко обнаруживаются при проведении пеленгационных измерений принимаемого ракурсного рассеяния /6/. В /8/ был проведен анализ влияния фокусирующих ионосферных неоднородностей на возбуждение нелинейных эффектов в F - слое ионосферы, показавший хорошее соответствие экспериментальных данных результатам расчета.

Если мы сопоставим размеры области рассеяния и уровень принимаемого сигнала для коротких импульсов ВН и для установившегося режима при длительном нагреве плазмы, то, как и в предыдущем разделе, мы с необходимостью должны сделать вывод о превышении первоначальной интенсивности флуктуаций плотности плазмы  $\sigma_{\perp} \approx 3$  м своего стационарного уровня. Отсюда следует, что "взрывная" стадия развития амплитуды рассеянного сигнала /1/ должна определяться ростом интенсивности флуктуаций плотности плазмы в локальных областях ВО, а дальнейший его рост до уровня насыщения - увеличением объема рассеяния и ростом интенсивности неоднородностей на его периферии, сопровождающимся одновременным уменьшением величины флуктуаций для  $l_{\perp} \lesssim 3$  м в этих первоначальных локальных областях. Естественно, что такая динамика ИИГ более присуща высоким мощностям ВН. При этом в некоторых случаях, как уже рассматривалось выше, может наблюдаться даже уменьшение интегральной интенсивности рассеяния при установлении стационарного уровня турбулентности.

6. Сформулируем кратко основные выводы, которые следуют

из результатов экспериментальных исследований по воздействию мощным импульсным излучением на плазму F - слоя ионосферы.

а) Развитие ИИН начинается спустя некоторое время  $t_0$  после включения ВН. Это время зависит от масштаба неоднородностей:  $t_0 \approx 50-100$  мс для  $l_1 \approx 3$  м и  $t_0 \approx 100-200$  мс для  $l_1 \approx 7$  м, т.е. приблизительно соблюдается зависимость  $t_0 \propto l_1$ . Доказано, что вначале, как правило, ИИН развиваются в отдельных локальных областях ВО.

б) Если турбулентность во время нагрева не достигает своего стационарного состояния, то развитие неоднородностей продолжается и после выключения ВН.

в) При релаксации ИИН их скорость расплывания на первом этапе в несколько раз превышает скорость расплывания неоднородностей, достигших стационарного уровня своего развития, и только на втором этапе эти скорости сравниваются. Важно, что релаксация для неоднородностей с  $l_1 \approx 3$  м начинается раньше, чем для более крупных ( $l_1 \approx 7$  м), и за время быстрой релаксации происходит их более сильное ослабление.

г) Сравнение динамики развития ИИН различных масштабов показывает, что вначале (в первые несколько секунд при  $P_3 \approx 150$  МВт для  $f_{ВН} \approx 5$  МГц) в спектре флуктуаций плотности плазмы наблюдается максимум спектральной интенсивности в области масштабов  $l_1 \approx 3$  м. Более того, наблюдается уменьшение интенсивности этих неоднородностей при развитии более крупномасштабной турбулентности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные новые данные по динамике ИИН позволяют в значительной мере детализировать процесс их образования. В настоящее время здесь нет полной ясности относительно последовательности этапов трансформации энергии ВН в флуктуации плотности плазмы — процессов, обуславливающих наблюдаемую задержку их генерации при включении и выключении нагрева. Обнаруженное нами при больших уровнях мощности ВН уменьшение интенсивности неоднородностей с  $l_{\perp} \approx 3$  м при развитии более крупных неоднородностей, может свидетельствовать о существовании определенных отличительных особенностей генерации неоднородностей различных масштабов. Этот вывод подтверждается также наблюдаемым изменением динамики аномального ослабления радиоволн /9/, когда при мощностях ВН  $P_3 \approx 10$  МВт появляется его быстрая стадия развития. Возможно с этим же связано существование "быстрой" компоненты искусственного радиоизлучения ионосферной плазмы, отличающейся по своим характеристикам от свойств стационарного уровня излучения.

При проведении экспериментов с короткими импульсами излучения ВН обнаружено изменение характера релаксации ИИН, если они не успевали достигнуть стационарного уровня своего развития. При этом расплывание мелкомасштабных неоднородностей происходило с коэффициентом диффузии  $D = 4-6 D_{e1}$ , что в 2-3 раза быстрее по сравнению со скоростью релаксации стационарной турбулентности. Последнее свидетельствует о существовании некоторое время после выключения ВН аномального характера диффузии, которая, согласно /II/, может обуславливаться развитием неустойчивости плазменных образований. Здесь важно отметить, что переход к обычно наблюдаемой скорости расплывания стационарной турбулентности для  $l_{\perp} \approx 2,5-3$  м происходит практически одновременно для всех масштабов.

Прогресс по всем этим направлениям экспериментальных исследований связан с расширением диапазона масштабов  $\nu_1$ , в котором проводятся измерения, а также в использовании более сложных (комбинированных) режимов излучения ВН, которые позволяют подчеркнуть определённые свойства искусственной ионосферной турбулентности. Решение поставленных в настоящей работе вопросов несомненно откроет новые возможности в управлении свойствами искусственной турбулентности.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Л.М.Ерухимов, С.А.Метелев, Э.Е.Митякова, Е.Н.Мясников, А.В.Рахлин, В.П.Урядов, В.Л.Фролов. Экспериментальные исследования искусственной ионосферной турбулентности. - В сб.: Тепловые нелинейные явления в плазме. - Горький : ИПФ АН СССР, 1979. - С.7-42.
2. В.А.Эззин, Г.П.Комраков, А.М.Насыров, В.А.Рыжов, В.А.Стрекалов. О ракурсном рассеянии радиоволн в ионосфере при импульсном воздействии на нее мощным КВ радиоизлучением. // Тез. докл. на Международном симпозиуме по модификации ионосферы мощным радиоизлучением. - М: ИЗМИРАН, 1986. - С.75-76.
3. А.Ф.Беленов, В.А.Бубнов, Л.М.Ерухимов, Ю.В.Киселев, Г.П.Комраков, Э.Е.Митякова, Л.И.Рубцов, В.П.Урядов, В.Л.Фролов, Ю.В.Чугунов, Б.В.Джматов. О параметрах искусственных мелкомасштабных неоднородностей. //Изв. вузов. Радиофизика. - 1977. - Т.20, № 12. - С.1805-1813.



4. Л.М.Ерухимов, С.А.Метелев, Н.А.Митяков, В.Л.Фролов. Экспериментальные исследования искусственной ионосферной турбулентности. //Тез. докл. на Международном симпозиуме по модификации ионосферы мощным радиоизлучением. - М : ИЗМИРАН, - 1986. - С.21-22.
5. Л.М.Ерухимов, В.А.Эвзин, Г.П.Комраков, С.А.Метелев, Н.А.Митяков, В.Л.Фролов. Нагрев ионосферной плазмы мощным радиоизлучением. //Изв. вузов. Радиофизика. - 1982. - Т.25, № 7. - С.843-844.
6. Коровин А.В., Насыров А.М., Проскурин Е.В., Ягнов Н.К. Результаты угловых измерений при рассеянии УКВ на искусственных неоднородностях. //Изв. вузов. Радиофизика. - 1981. - Т.24, № 6. - С.675-679.
7. Л.М.Ерухимов, С.А.Метелев, Н.А.Митяков, Э.Е.Митяков, В.Л.Фролов. О неоднородной структуре возмущенной области ионосферы. //Тез. докл. на XIII Всесоюзной конференции по распространению радиоволн. - М: Наука, - 1981. - С.130-132.
8. Л.М.Ерухимов, С.А.Метелев. О влиянии фокусирующих ионосферных неоднородностей на возбуждение нелинейных эффектов в F - слое ионосферы. //Тез. докл. на Международном симпозиуме по модификации ионосферы мощным радиоизлучением. - М : ИЗМИРАН, - 1986. - С.67-66.
9. В.Л.Фролов, К вопросу об аномальном ослаблении радиоволн в возмущенной области ионосферы. //Изв. вузов, Радиофизика. - 1986г. ( в печати).
10. Л.М.Ерухимов, В.Л.Фролов. Динамические и спектральные характеристики искусственного радиоизлучения ионосферной плазмы. //Препринт № 185 - Горький, НИРФИ. - 1985. - 66 с.

II. В.Е.Голант. Диффузия заряженных частиц плазмы в магнитном поле.//УФН. - 1963. - Т.79, вып.3. - С.377-440.

Дата поступления статьи

27 апреля 1987 г.

Алексей Федорович Беленов  
Лев Михайлович Ерухимов  
Виктор Алексеевич Зюзин  
Альберт Махмутович Насыров  
Владимир Алексеевич Стрекалов  
Владимир Леонтьевич Фролов

О ДИНАМИКЕ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ ИСКУССТВЕННЫХ  
ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ

---

Подписано в печать 30.09.87 г. МЦ 01080 . Формат 60 x 84 / 16  
Бумага множительная. Печать офсетная. Объем 1,81 усл. печ. л.  
Заказ 4610. Тираж 120. Бесплатно

---

Отпечатано на ротапринте Н И Р Ф И