

**Нижегородский научно-исследовательский радиофизический институт
Государственного комитета РФ по высшему образованию**

П р е п р и н т N 376

**ОТКЛИК ИОНОСФЕРЫ
НА ВОЗМУЩЕНИЕ МОЩНОЙ РАДИОВОЛНОЙ**

**Ф.И.Выборнов
Э.Е.Митякова
А.В.Рахлин**

Нижний Новгород 1993

Выборнов Ф. И., Митякова Э. Е., Рахлин А. В.

ОТКЛИК ИОНОСФЕРЫ НА ВОЗМУЩЕНИЕ МОЩНОЙ РАДИОВОЛНОЙ.

Препринт N 376. – Нижний Новгород: НИРФИ, 1993. – 27 с.

УДК 550.388.2

На основе сравнительного анализа большого объема экспериментальных данных показано, что характеристики естественного F-spread в значительной степени совпадают с параметрами искусственной диффузности (ИД), возбуждаемой в ионосфере при воздействии на нее мощного радиоизлучения и это обстоятельство может быть использовано для моделирования естественного F-рассеяния в ионосфере.

На основе анализа естественных возмущений ионосферы по большому объему данных станции вертикального зондирования выявлен рост появляемости F-spread с ростом номера циклов солнечной активности и сделано предположение, что рост возмущенности ионосферы за последние десятилетия может быть обусловлен непреднамеренным воздействием на ионосферу электрических и магнитных полей, а также влиянием иных источников антропогенного характера.

При воздействии мощным радиоизлучением на ионосферную плазму вследствие большого разнообразия физических условий в ионосфере наблюдается развитие широкого спектра явлений, к которым в первую очередь следует отнести:

а) нагрев электронов в поле мощной радиоволны и связанные с ним изменения электронной концентрации [1];

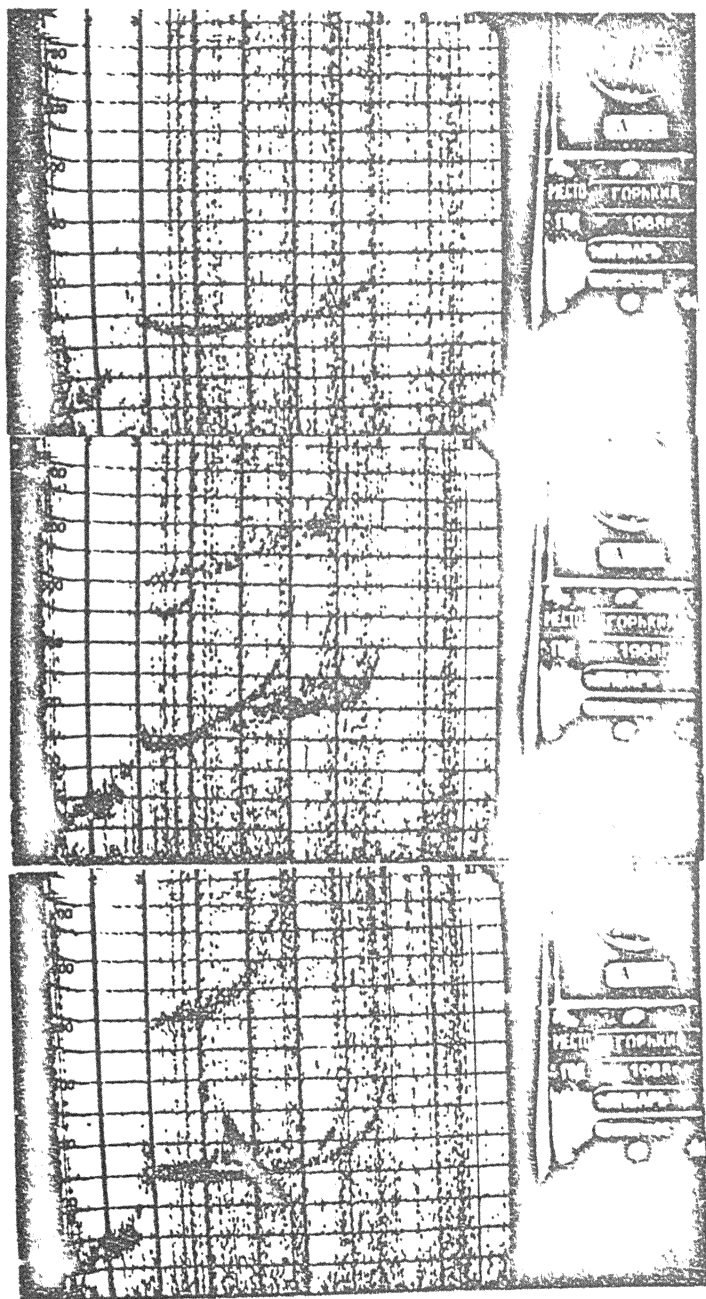
б) изменение в результате нагрева плазмы ее проводимости и связанные с этим вариации плотности ионосферных токов [2,3];

в) развитие вблизи уровня отражения волны накачки (ВН) параметрических неустойчивостей и как следствие этого – генерация плазменной турбулентности [4–6].

Указанные процессы имеют различные пороги по мощности волны накачки и характерные времена развития, существенно зависят от ионосферных условий. Они могут взаимно усиливать и ослаблять друг друга. Поэтому отклик ионосферы при воздействии мощным радиоизлучением носит сложный, а зачастую многоступенчатый характер.

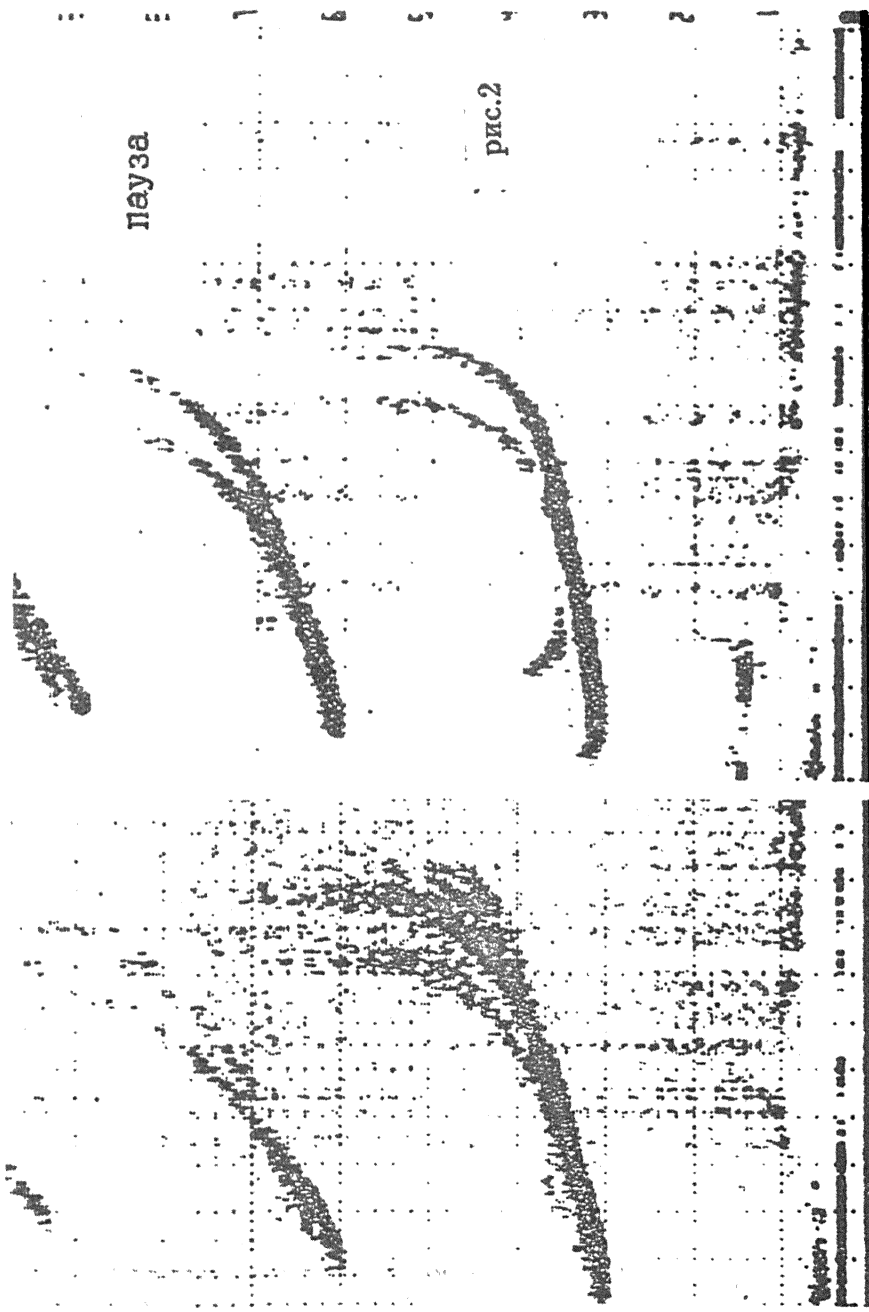
Ниже мы остановимся на одном виде реакции ионосферы на зондирование ее мощной радиоволной – искусственной диффузности (ИД), которая легко прослеживается на обычных ионограммах вериткального зондирования (см.рис 1,2).

Впервые это явление было обнаружено в экспериментах по искусственной модификации ионосферы в Боулдаре (США) [7] и независимо в Горьком в НИРФИ [8]. Эксперименты показали, что ИД легко создается в дневной ионосфере, а ее характеристики внешне очень похожи на естественный F-spread, хотя в естественных условиях диффузность отраженных сигналов имеет место в ночное время, обычно после полуночи [9]. Времена развития и релаксации ИД в дневных условиях составляли несколько (7–10) минут, в ночных – время релаксации может быть существенно больше, достигая десятков минут. Кроме того отмечалось, что ИД в слое F1 исчезает быстрее, чем в слое F2 ионосферы. При воздей-



пауза

рис.2



0.01 0.05 0.15 0.30 0.45 0.60 0.75 0.90 0.95

ствии на слой F2 диффузность сначала развивается на частотах, близких к частоте ВН, быстро захватывая всю верхнюю часть ионограммы и постепенно опускаясь в область более низких частот. При этом диффузность может распространяться на отражения, отвечающие слою F1 ионосферы, захватывая интервал высот 100–150 км. ИД в F-слое возникает как при воздействии радиоизлучением "o"-поляризации, так и "x"-поляризации, хотя в последнем случае наблюдаются существенные отличия в характере и временных параметрах ИД.

С началом экспериментов на нагревном стенде "Сура" исследования ИД были продолжены. В них удалось выявить ряд важных особенностей образования ИД [10]. Было установлено, в частности, что для развития заметной диффузности отраженных сигналов мощность ВН "o"-поляризации должна быть не менее 10 МВт. Постепенное увеличение мощности ВН (за счет последовательного включения передатчиков с $P_{oi} = 250$ кВт) приводят вначале к росту интенсивности ИД, а затем к насыщению при мощностях ВН $P_{o\phi\phi} \geq 50$ МВт. При воздействии на ионосферу волнами "x"-поляризации необходимы более высокие уровни мощности ВН, и насыщения, аналогичного случаю "o"-компоненты, по известным результатам экспериментов, не отмечается.

При мощностях ВН $P_{o\phi\phi} \sim 50 - 100$ МВт диффузность на ионограммах начинает появляться через 2–3 минуты, а полного своего развития достигает через 5–10 минут при непрерывной работе стенда.

Поскольку ИД наблюдалась практически при любых характеристиках ВН и режимах работы нагревного стенда, то мы приведем результаты изучения ИД, полученные как в экспериментах по исследованию ракурсного рассеяния радиоволн возмущенной областью (ВО), радиопросвечиванию ВО сигналами бортовых передатчиков ИСЗ, так и в экспериментах по целенаправленному созданию ИД.

В исследованиях, проводимых в НИРФИ, имелась возможность получать ионограммы вертикального зондирования (ВЗ) как непосредственно в пункте нагрева (Васильсурск), так и в 120 км западнее от него, в Горьком.

Один из таких экспериментов по целенаправленному созданию искусственной диффузности с помощью стенда "Сура" был проведен в дневные часы в январе 1987 года. Его результаты представлены на рис.3а-3г в виде временных зависимостей величины критической частоты слоя F2, высоты регулярного слоя F2, которая фиксировалась по h_p на частоте 4,25 МГц, а также ширины следа необыкновенной компоненты Δf_x на ионограммах станции ВЗ "Базис" в Васильсурске и АИС в Горьком. На временной оси сплошными линиями отмечены циклы нагрева, частоты нагрева указаны на рисунке. Анализ результатов этого эксперимента показал следующее:

1. Искусственная диффузность различной интенсивности возникала во всех циклах нагрева и регистрировалась как в Васильсурске, так и на расстоянии 120 км;

2. Длительность нагрева 5-10 минут достаточна для создания ИД, дальнейшее продолжение нагрева увеличения интенсивности не дает;²

3. Интенсивность ИД растет при подъеме высоты слоя F2 ионосферы.

4. При наличии на ионограммах перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) интенсивность ИД возрастает.

Последние два обстоятельства обнаруживают значительное сходство между искусственным и естественным F-spread. Известно [9], что частота появления и интенсивность естественного F-spread возрастает при увеличении действующей высоты слоя и обнаруживает теснейшую связь с ПИВ.

В проводившихся экспериментах было установлено, что

¹Вследствие эффекта аномального ослабления на ионограммах ВЗ часто наблюдается только "z"-компонента отраженного сигнала.

²Отмечены случаи, когда нагрев длительностью 5 минут вызвал ИД большей интенсивности, чем нагрев длительностью 15 минут.

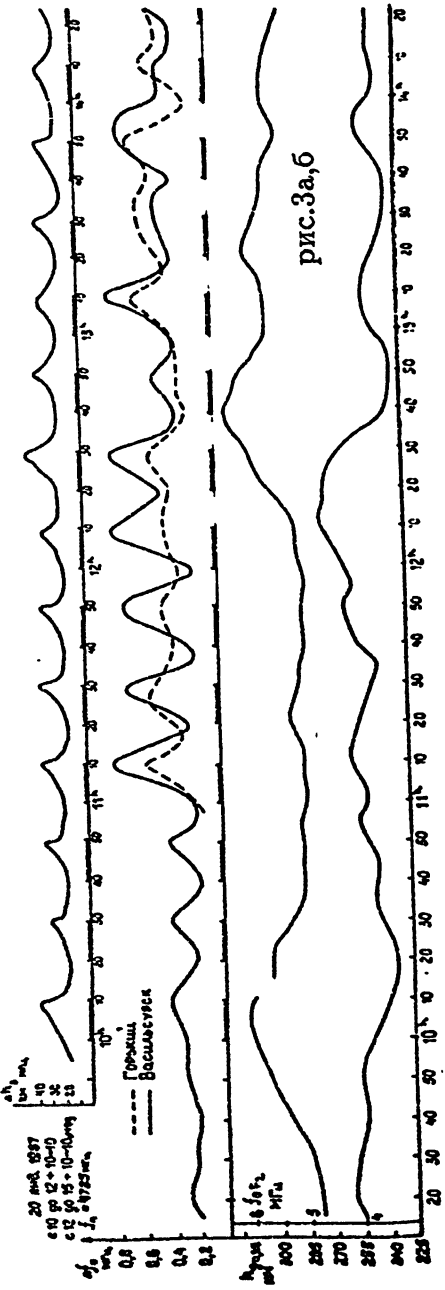
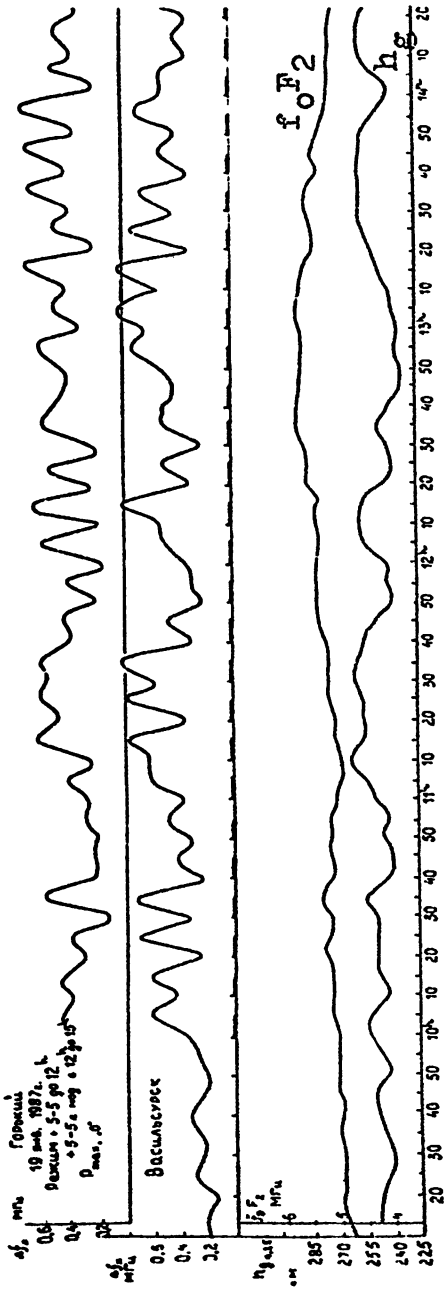


рис. 3а, б

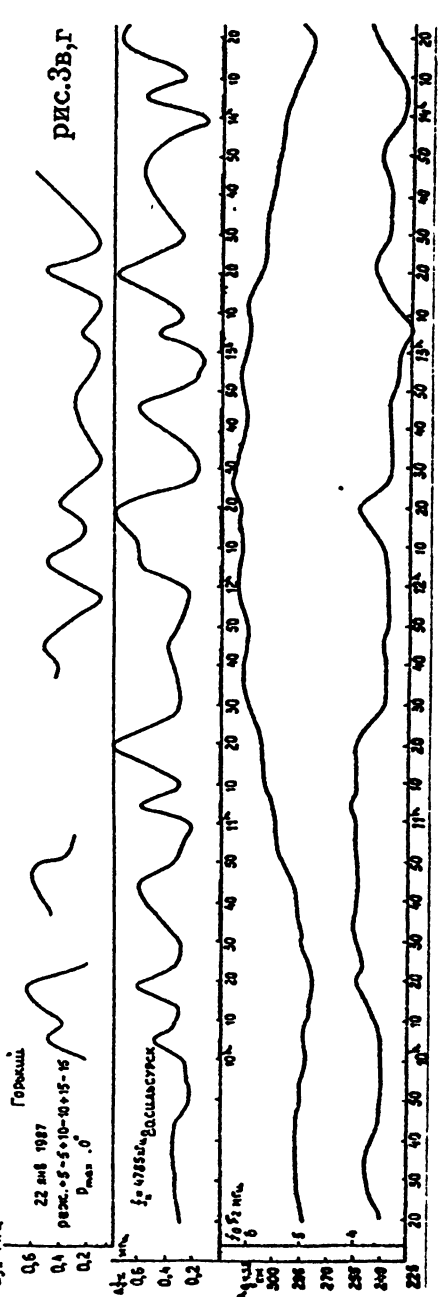
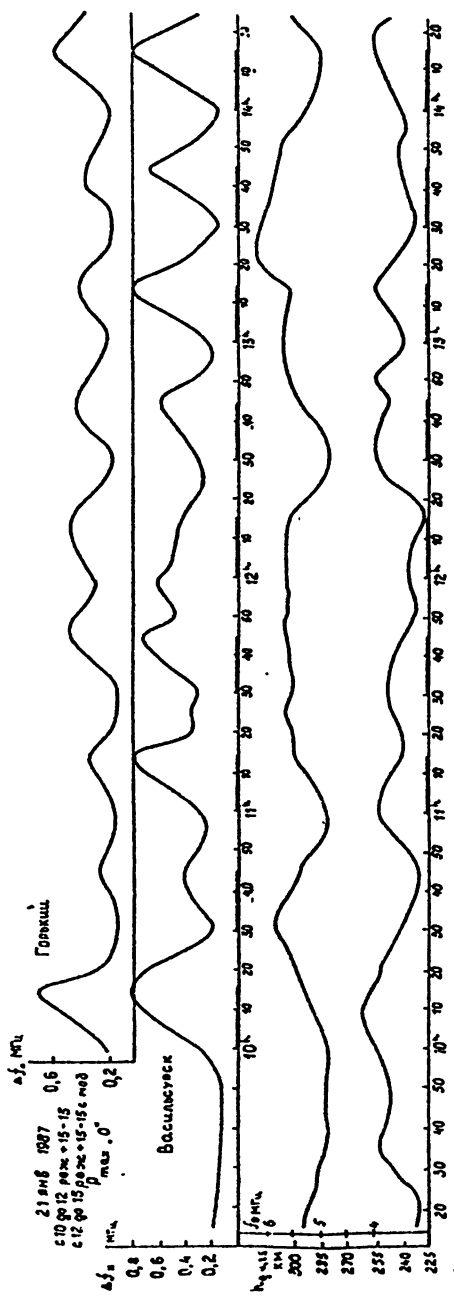


рис.Зв,Г

внешний вид искусственной диффузности в значительной степени определяется состоянием ионосферы до начала воздействия. Если на ионограммах до первого включения нагрева имели место различного рода аномалии (упомянутые выше ПИБ, естественная диффузность, дополнительные отражения и т.п.) хотя и в слабо развитом виде, то ИД, как правило, имела большую интенсивность, захватывала большой высотный интервал и часто сопровождалась появлением дополнительных наклонных отражений, утроением или учетверением отраженных следов. Пример такой ИД в период ее релаксации представлен на рис. 4.

Кроме того, исследования показали, что интенсивность ИД зависит от отношения $f_{вн}/f_oF_2$, когда с приближением уровня отражения ВН к максимуму F-слоя интенсивность рассеяния увеличивалась. В то же время при уменьшении f_oF_2 вследствие суточного хода и фиксированной $f_{вн}$ искусственная диффузность продолжала возбуждаться от цикла к циклу нагрева вплоть до $f_{вн} \geq (1.1 - 1.15)f_oF_2$.

Явление F-spread в ионосфере в естественных условиях связывают с рассеянием радиоволн на неоднородностях электронной концентрации с размерами $l = (1 - 5)$ км [9-11]. Данные по релаксации искусственного F-spread, а также результаты измерения времени исчезновения мерцаний сигналов дискретных источников [8] показывают, что здесь мы имеем дело с генерацией искусственных неоднородностей с размерами $l_1 \simeq (1 - 5)$ км, для которых значения флуктуаций концентрации плотности плазмы могут достигать значений $\Delta N/N \sim (1 - 5)10^{-2}$. Как показали измерения, эти крупномасштабные неоднородности (КН) занимают значительный высотный интервал $\Delta h \geq (100 - 150)$ км, а протяженность области возмущения по горизонтали превышает 200 км.

Измерения характеристик ВО с помощью просвечивания ее сигналами геостационарного ИСЗ [12] показали, что при модификации ионосферы возбуждаются неоднородности ши-

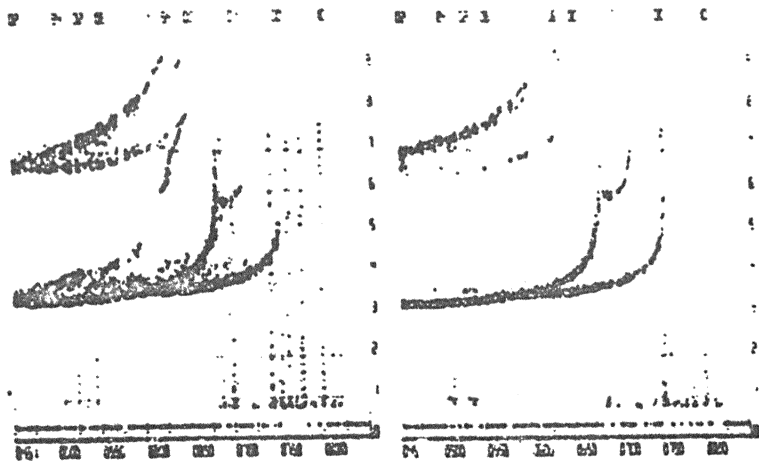
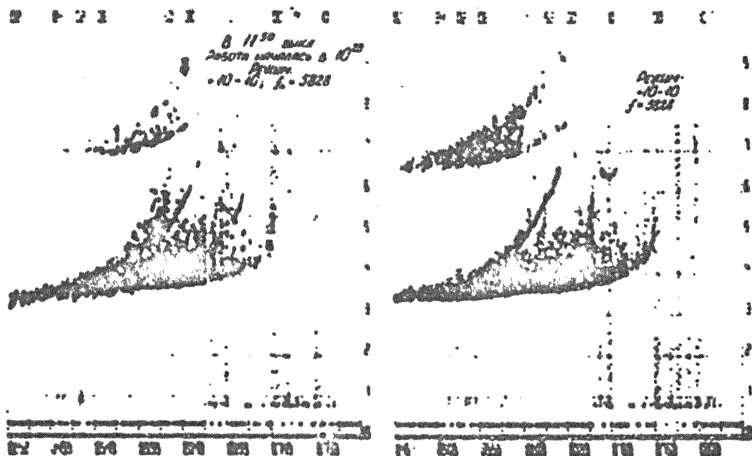


рис.4

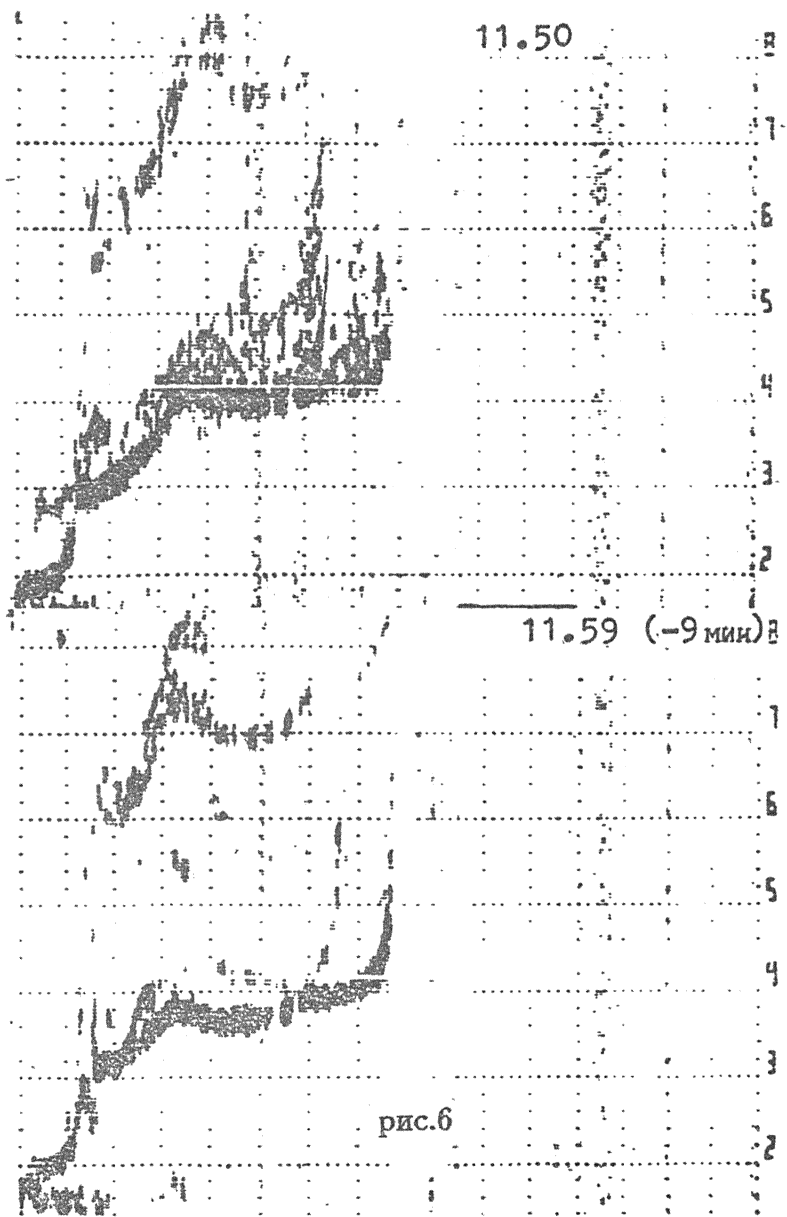
рокого спектра масштабов и в том числе КН с размерами $l_{\perp} \simeq (1 - 2)$ км. Времена их релаксации составляли 4–10 минут, что соответствует временам релаксации ИД. Одновременные наблюдения ионограмм ВЗ в пункте нагрева выявили наличие диффузности в периоды, когда отмечались искусственные мерцания сигналов ИСЗ, причем ИД, как правило, не исчезала в паузах нагрева $T_{\text{пауза}} \sim (5 - 8)$ мин.

Эксперименты по ракурсному рассеянию показывают четкую связь интенсивности мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (или величины эффективного поперечника ракурсного рассеяния радиоволн σ) с естественной возмущенностью ионосферы. С другой стороны характеристики ИД также обнаруживают связь с состоянием ионосферы, предшествующим нагреву. Результаты анализа этих двух фактов приведены на рис.5, характеризующем зависимость σ от интенсивности искусственной диффузности. Здесь D1, D2 и D3 соответствуют уровням слабой, умеренно сильной и сильной диффузности.³

В работе [10] обсуждается роль неоднородностей различного масштаба в формировании ИД. На основании экспериментальных данных показано, что F-spread небольшой величины может быть вызван неоднородностями сравнительно небольшого масштаба ($l \leq (1 - 3)$ км); времена его развития и релаксации порядка минуты. Своей максимальной величины ИД достигает, как правило, за 3–5 минут, что соответствует развитию неоднородной структуры с $l \leq (10 - 40)$ км, однако неоднородности с $l_{\perp} \leq (1 - 5)$ км вносят значительный вклад в явление диффузности. Там же ([10]) показано, что существуют способы возбуждать ИД, сопровождаемую дополнительными особенностями на ионограммах, рис.6.

В 1983 г. на нагревном стенде "Гиссар" (Душанбе) были проведены эксперименты по искусственному возбуждению не-

³Параметры D1, D2, D3 аналогичны параметрам, характеризующим естественный F-spread.



однородной структуры ионосферы [13]. Измерения показали, что при нагреве ионосферы непрерывным излучением развивалось явление искусственного F-spread. Если же нагрев осуществлялся с модуляцией несущей частотой F_m [14] и включался с периодом $T_2 \simeq (2-5)$ мин., то развивалось явление типа крупномасштабных возмущений, которые практически никогда не наблюдались ранее. Пример одного из таких возмущений типа "цветочек" показан на рис. 7 среди серии ионограмм вертикального зондирования. Явление наблюдалось в утренние и вечерние часы, когда поглощение радиоволн было минимальным и носило пороговый характер с $P_{в,пор} \sim 9$ МВт.

Остановимся еще на одном эксперименте, который очень наглядно характеризует реакцию ионосферы на длительный нагрев мощной радиоволной. В феврале 1986 г. при работе нагревного стенда "Сура" на необыкновенной компоненте после двух часов работы в паузе, через несколько минут после окончания нагрева, на ионограмме появилось крупномасштабное возмущение, которое раньше на ионограммах в Васильурске никогда не наблюдалось: мощные наклонные диффузные отражения, охватывающие диапазон частот от 6 до 9 МГц, а высот от 250 до 500 км. Внешне они были очень похожи на наблюдавшиеся ранее на стенде "Гиссар" (но при иных режимах нагрева) и по аналогии мы назвали их "цветком" (рис.8). После часовой паузы нагрев снова был включен и опять появились аналогичные возмущения (рис.9). Время релаксации таких крупных возмущений составляло 15 - 25 минут.

В январе 1987 г. был повторен тот же режим нагрева и опять в паузах появились аналогичные "цветки" (рис.10). 28 и 29 мая 1987 г. в Васильурске была опять предпринята попытка повторить этот режим. 28 мая четыре часовых цикла нагрева необыкновенной компонентой дали в паузе крупномасштабные возмущения (рис.11). 29 мая был проведен

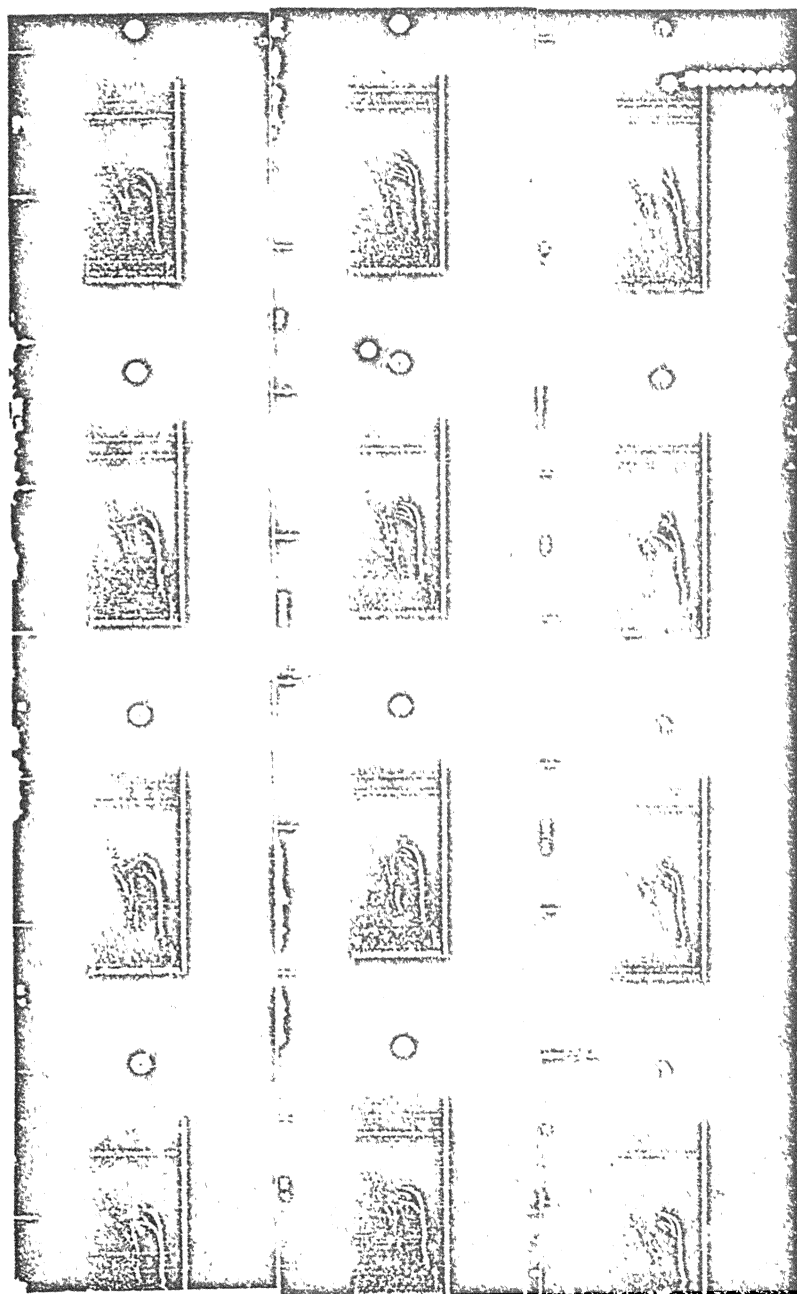
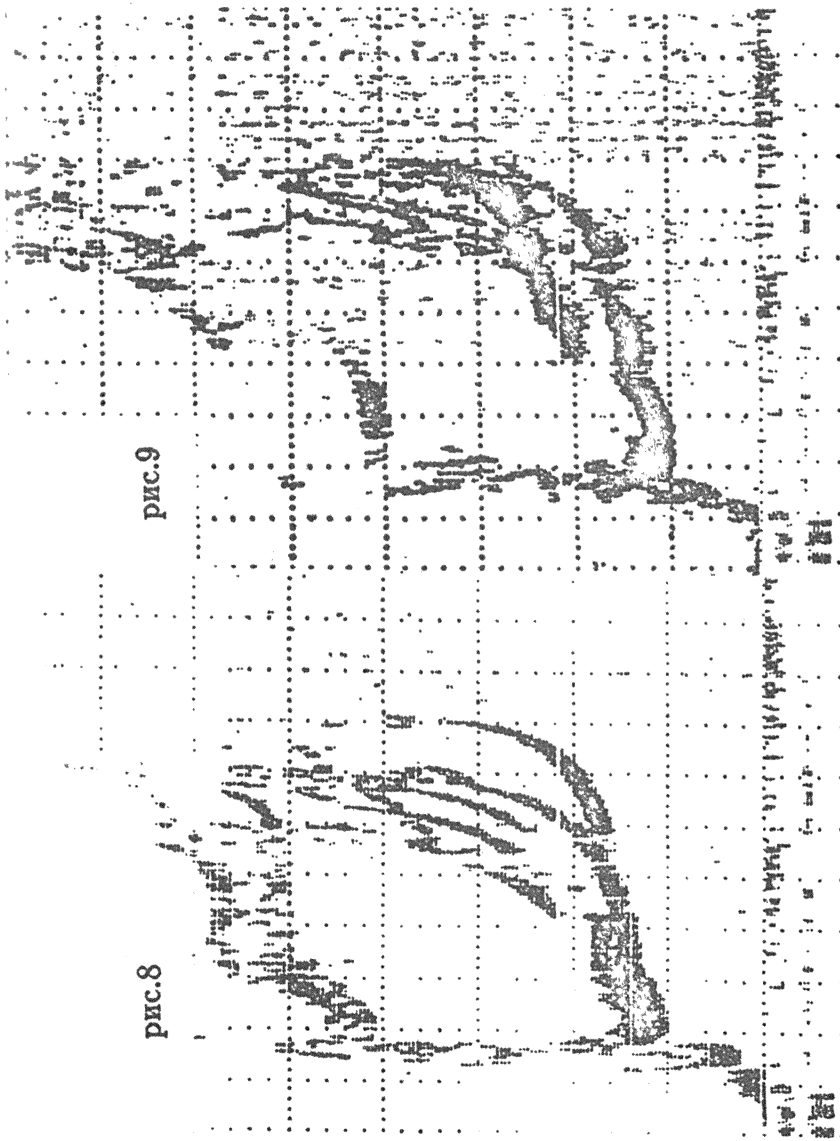


рис.7

рис.8

рис.9



112 1130 1135 1140 1145 1150 1155 1160 1165 1170 1175 1180 1185 1190 1195 1200 1205 1210 1215 1220 1225 1230 1235 1240 1245 1250 1255 1260 1265 1270 1275 1280 1285 1290 1295 1300 1305 1310 1315 1320 1325 1330 1335 1340 1345 1350 1355 1360 1365 1370 1375 1380 1385 1390 1395 1400 1405 1410 1415 1420 1425 1430 1435 1440 1445 1450 1455 1460 1465 1470 1475 1480 1485 1490 1495 1500 1505 1510 1515 1520 1525 1530 1535 1540 1545 1550 1555 1560 1565 1570 1575 1580 1585 1590 1595 1600 1605 1610 1615 1620 1625 1630 1635 1640 1645 1650 1655 1660 1665 1670 1675 1680 1685 1690 1695 1700 1705 1710 1715 1720 1725 1730 1735 1740 1745 1750 1755 1760 1765 1770 1775 1780 1785 1790 1795 1800 1805 1810 1815 1820 1825 1830 1835 1840 1845 1850 1855 1860 1865 1870 1875 1880 1885 1890 1895 1900 1905 1910 1915 1920 1925 1930 1935 1940 1945 1950 1955 1960 1965 1970 1975 1980 1985 1990 1995 2000

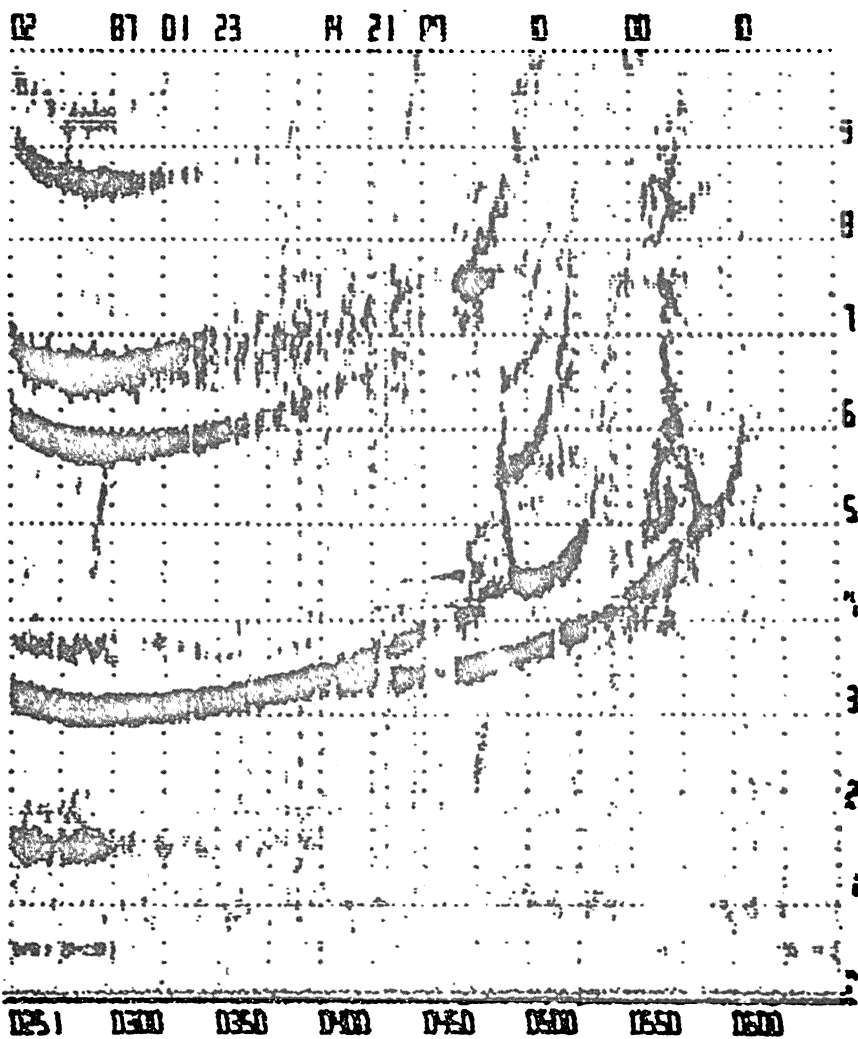


рис.10

длительный нагрев на обыкновенной компоненте – на ионограмме сильная диффузность (рис.12).

В работе [15] приведены результаты исследования модифицированной мощным радиоизлучением ионосферы с помощью некогерентного рассеяния радиоволн. Измерения, показали наличие гигантских возмущений со значением $T_e/T \simeq 3$ и $\Delta N/N > 5 \cdot 10^{-1}$. Времена развития подобных возмущений составляли ~ 5 сек., времена релаксации превышали полчаса. В [15] отмечается, что такие возмущения наблюдаются только после местной полуночи в зимней ионосфере. В другое время при аналогичных условиях эксперимента $\Delta N/N$ не превышали 10^{-1} .

Не исключено, что в последние три явления, связанные с возбуждением крупномасштабной искусственной ионосферной турбулентности, различны по своему происхождению, хотя внешне их проявления очень похожи.

Приведенные выше результаты показывают возможность искусственного моделирования в ионосфере процессов и явлений, наблюдаемых в естественных (без целенаправленного воздействия) условиях. Мы не будем анализировать их многообразие, а по-прежнему будем рассматривать эффекты, связанные с F-рассеянием.

Мы уже упоминали, что ИД обладает, с одной стороны, характеристиками, сходными с F-spread, и в тоже время сравнительно легко возбуждается в дневных условиях, а вероятность появления ИД носит квазипороговый характер в зависимости от мощности электромагнитной волны, воздействующей на ионосферу. Основная направленность исследований, связанных с искусственным нагревом – изучение свойств ионосферной плазмы. В данном случае речь идет о целенаправленных экспериментах, единичных установках, работающих в ограниченных временных интервалах. Но даже при этих ограничениях необходимо рассматривать складывающуюся ситуацию в несколько ином плане. Если одна мощ-

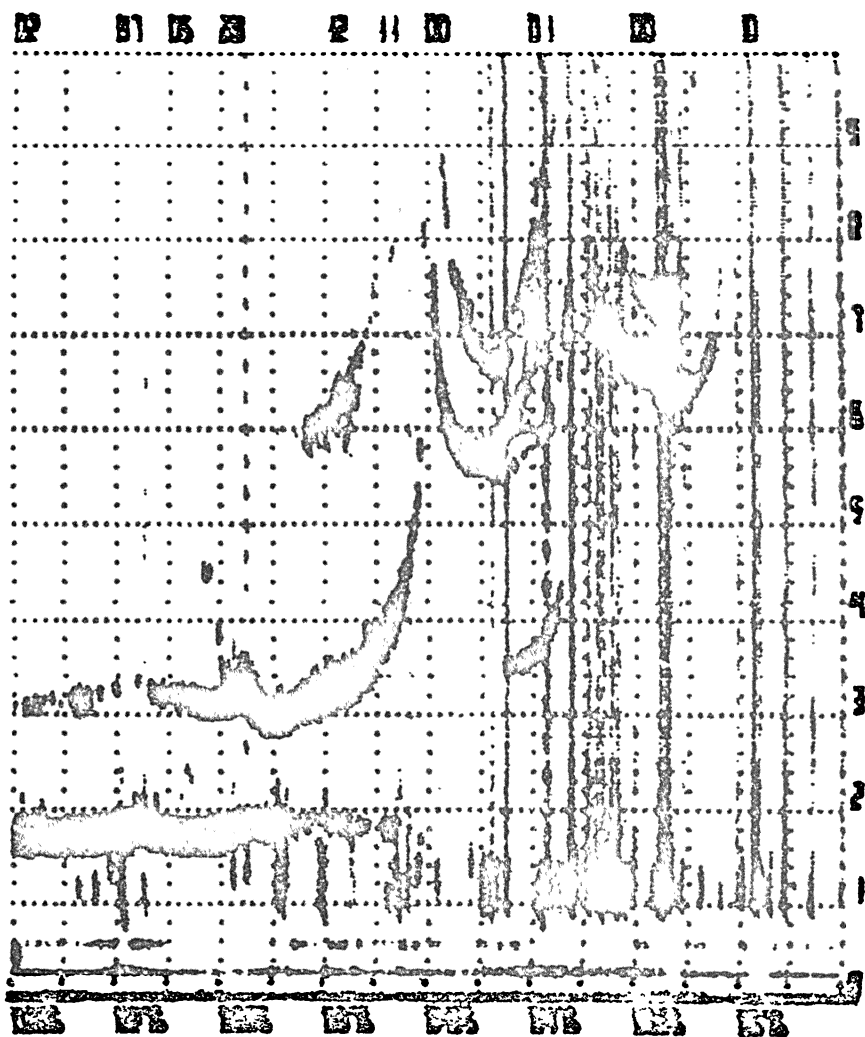


рис.11

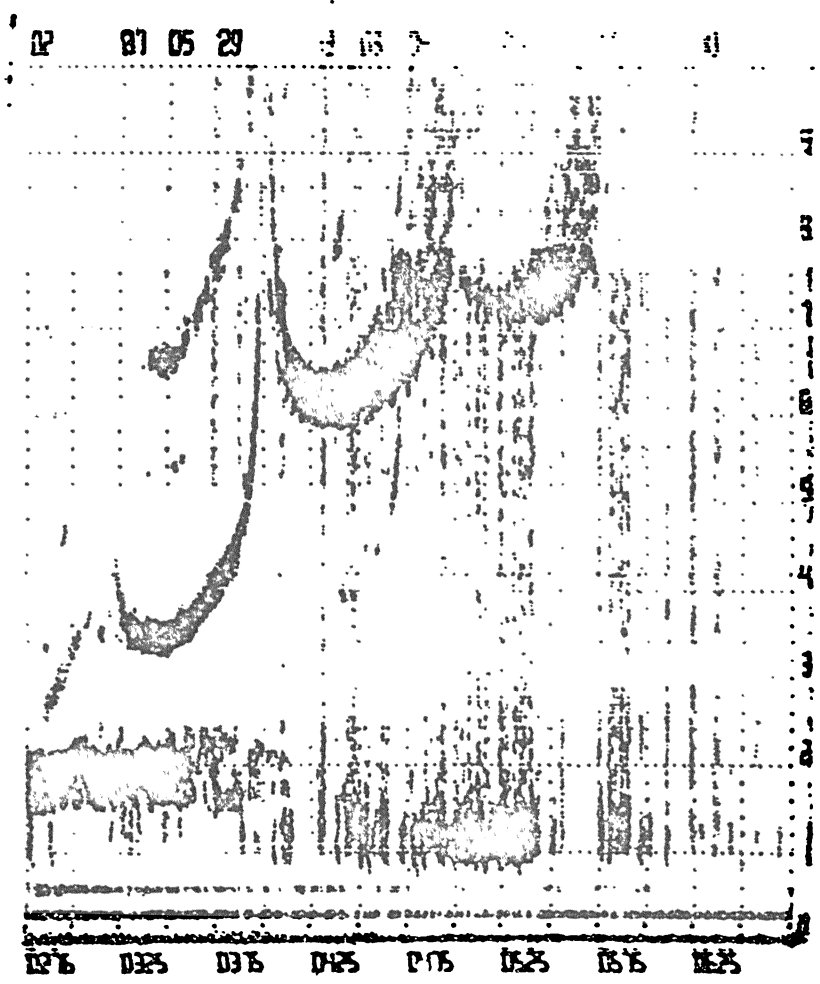


рис.12

ная КВ установка создает в ионосфере возмущения, существенно влияющие на состояние ионосферы и, как следствие, на ее неоднородную структуру, то логично предположить, что подобным же образом влияет на окружающую нас ионизированную плазму вся совокупность радиопередатчиков и иных источников электромагнитных излучений, суммарная мощность которых постоянно возрастает [16].

Проведенный предварительный анализ вероятности появления "естественного" F-spread⁴ для различных сезонов и уровней солнечной активности позволил получить следующие результаты:

– В летние месяцы (май - сентябрь) F-spread отмечается в 30% случаев наблюдений и не обнаруживает какой-либо зависимости от солнечной активности и от дней недели (рабочие/выходные) [17].

– В зимние и равноденственные месяцы (октябрь – апрель) в среднем для всех уровней солнечной активности обнаруживается недельная периодичность появляемости F-spread с характерным снижением уровня появляемости на 15 – 20% в выходные дни по сравнению со средним за неделю [17]. Подобная зависимость может быть связана с возможным сокращением в выходные (и предвыходные) дни количества (или времени работы) различных излучателей электромагнитных волн, являющихся коллективным возмущающим источником.

– Обнаружен рост появляемости F-spread с ростом номера циклов солнечной активности. В ночные зимние часы для одинаковой фазы солнечных циклов усредненная за период наблюдений интенсивность F-spread составила соответственно: $k = 0,7$ (1970г.), $1,1$ (1981 г.), $1,4$ (1992 г.), где $0 \leq k \leq 3$ ($k = 0$ соответствует отсутствию F-spread).

Эти результаты, а также вышеприведенные рассуждения дают основание говорить о возможном элементе искусственности в образовании "естественного" F-spread (при отсут-

⁴По станциям ВЗ в г.г. Н.Новгороде и Москве

ствии целенаправленного воздействия на ионосферу), связанном с эффектом суммарного воздействия различных электромагнитных излучений на какие-либо области ионосферы. Т.е. рост возмущений ионосферы за последние десятилетия может быть обусловлен непреднамеренным воздействием на ионосферу различных источников антропогенного характера.

Кроме электромагнитных источников ионосферных возмущений необходимо учесть и другие факторы антропогенного характера, которые приводят к генерации ионосферных возмущений: промышленные и ядерные взрывы, инъекция химических реагентов, запуски спутников и ракет [18-20]. Поскольку во второй половине 20-го столетия имел место постоянный рост количества излучателей и их суммарной мощности, а также постоянный рост других факторов антропогенного характера, то не исключено, что некоторые наблюдаемые естественные ионосферные процессы спровоцированы антропогенной (техногенной) деятельностью. Если это так, то при проведении фундаментальных исследований происхождения неоднородной структуры ионосферной плазмы необходимо учитывать и прогнозировать ионосферные эффекты техногенного характера.

На наш взгляд простейшая методика определения роли антропогенных источников в образовании неоднородной структуры ионосферы состоит в выявлении постоянно растущей части ионосферных возмущений за последние 3-4 одиннадцатилетних цикла активности Солнца, когда имел место значительный рост промышленности. В то же время необходимо проведение теоретического анализа влияния различных источников антропогенного характера на ионосферные возмущения и оценка вклада этих источников в создание ионосферных неоднородностей различного масштаба. В результате проведения таких комплексных исследований может быть создана физическая модель ионосферных возмущений

антропогенного характера, на основании которой можно составить прогноз количественных характеристик некоторых ионосферных возмущений на ближайшие десятилетия в соответствии с известным прогнозом развития промышленного потенциала человечества.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант N 93-02-3360).

Литература

1. Гуревич А.В., Шварцбург А.Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. М. Наука, 1973
2. Иткина М.А., Котик Д.С. и др. Нагрев нижней ионосферы коротковолновым радиоизлучением. – Препринт НИРФИ, N 167, Горький, 1983
3. Грач С.М., Митяков Н.А., Трахтенгерц В.Ю. Ускорение электронов и дополнительная ионизация при параметрическом нагреве плазмы. "Физика плазмы", 12, вып. 6, с.693–701, 1986
4. Васьков В.В., Гуревич А.В. Параметрическое возбуждение ленгмюровских колебаний в ионосфере в поле сильных радиоволн. "Известия ВУЗов, Радиофизика", т.16, N 2, с.188-198, 1973
5. Ерухимов Л.М., Метелев С.А. и др. Экспериментальные исследования стрикционной параметрической неустойчивости в ионосфере. "Известия ВУЗов, Радиофизика", т.25, N 5, с.490-494, 1982
6. Васьков В.В., Гуревич А.В. Самофокусировочная и резонансная неустойчивости в F-области ионосферы. – В кн. "Тепловые нелинейные явления в плазме", Горький ИПФ АН СССР, с.81-138, 1979
7. Utlaut W.F., Cohen R. Modifying the ionosphere with intense radio waves, Science, v.174, No 4006, p.245, 1971.

8. Беликович В.В. и др. Новые результаты исследований нелинейных явлений в ионосфере."Изв.ВУЗов Радиофизика", т.18, N 4, с.516, 1975
9. Гершман Б.Н.,Казимировский Э.С., Кокуров В.А., Чернобровкаина Н.А. Явление F-spread рассеяния в ионосфере. М. 1984
10. Ерухимов Л.М., Митякова Э.Е. Неоднородная структура ионосферы и ее связь с волновыми возмущениями.- В сб. "Динамика ионосферы", ч.3, Алма-Ата, с.18, 1991
11. Алимов В.А., Ерухимов Л.М. и др. К теории явления F-spread в ионосфере. Геомагнетизм и аэрономия, т.11, N 5, с.790-797, 1971
12. Ерухимов Л.М., Ковалев В.Я. и др. О форме спектра искусственных ионосферных неоднородностей крупных масштабов, возбуждаемых при помощи нагревного стенда "Гиссар". Геомагнетизм и аэрономия, т.28, N 5, 1988
13. Ерухимов Л.М., Рубцов Л.Н., Щорс Ю.Г., 1984 г. ⁵
14. Фролов В.Л. Об явлении переноса модуляции при воздействии на ионосферную плазму мощным радиоизлучением. "Изв.ВУЗов Радиофизика", т.24, N 5, с.529-5326 1981
15. Duncan L.M., Sheerin J.P., Behnke R.A. Observation of ionospheric cavities generated by high-power radio waves. Phys. Rev.Lett. v.61, No 2, p.239-242, 1988
16. Перебейнос К. Актуальные проблемы радиоэлектроники. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств. Радио, N 10, с.22, 1979
17. Крупеня Н.Д., Митякова Э.Е., Рахлин А.В.(НИРФИ), Непомнящая Е.В., Пушкиова Г.Н., Юдович Л.А.(ИЗМИР АН). О влиянии антропогенных процессов на ионосферу Земли. - Тезисы доклада, VIII Совещание-семинар по проблеме "Неоднородная структура ионосферы", с.73, Н.Новгород-Абрау, 1991
18. Федоров В.А. Создание искусственных ионосферных

⁵неопубликовано

возмущений с заданными свойствами в окрестности космического аппарата. Геомагнетизм и аэрономия, т.26, N 1, с.147, 1986

19. Цедилина Е.Е., Шашунькина В.М. Планетарные возмущения ионосферы, вызванные электрическим полем от высотного атомного взрыва "Морская звезда" 9 июля 1962 г. Препринт ИЗМИРАН СССР, N 45, 1989

20. Куликов А.М., Лобачевский Л.А., Романовский Ю.А. Возмущение в ионосфере от движущегося источника изотермической слабоионизированной плазмы. Препринт ИЗМИРАН СССР, N 25, 1990