

К.П. Гармаш, Л.Ф. Черногор, А.Б. Шварцбург

ВОЗНИКНОВЕНИЕ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ИОНОСФЕРЕ, ИНИЦИИРУЕМЫХ МОЩНЫМ НЕСТАЦИОНАРНЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ

Введение

В 70-80-х годах большое внимание уделяется исследованию реакции околоземной космической среды на мощное локальное энерговыделение. Заметное место в этих исследованиях занимает воздействие мощным радиоизлучением в широком диапазоне частот электромагнитных волн (от ОНЧ до СВЧ). Данным вопросам посвящено значительное число работ (см., например, библиографические указатели [1-3]). В них исследуются процессы в пределах диаграммы направленности антенны нагревной установки. Возникающие ионосферные возмущения имеют характерный масштаб от десятков

до сотни километров, то есть являются локализованными, и описываются известной теорией [4,5]. Вместе с тем имеются экспериментальные факты, которые невозможно объяснить в рамках существующей теории.

Целью данной работы является анализ ряда "аномальных" эффектов с единых методологических и теоретических позиций.

Результаты экспериментов

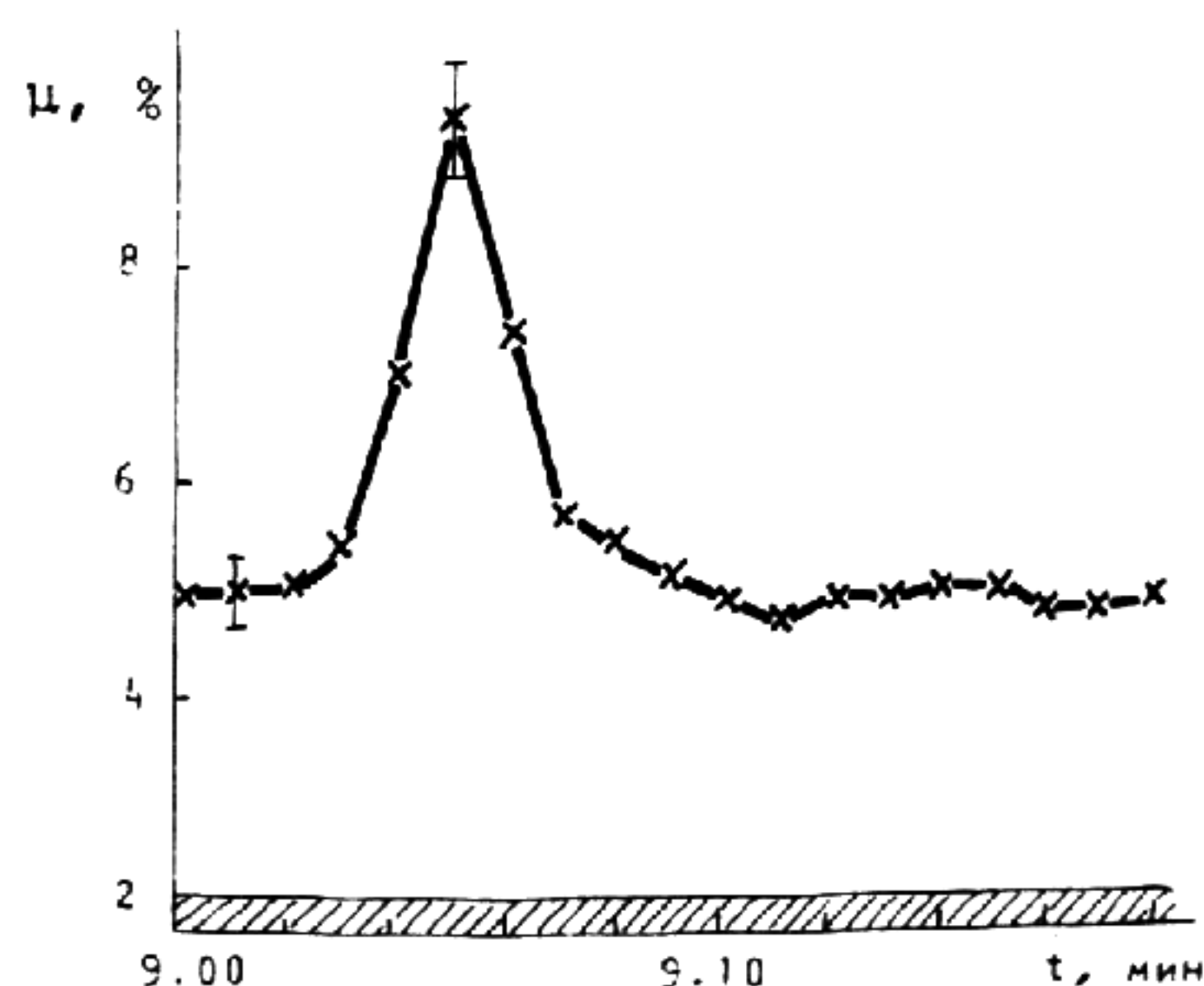
В начале 70-х годов нами с использованием мощной установки [6] проведена серия экспериментов с целью диагностики нижней ионосферы при помощи эффектов самовоздействия и кроссмодуляции радиоимпульсов (см., например, [7]).

Основные параметры стенда следующие: средняя эффективная мощность $P_1 G_1 \approx 10$ МВт, частота $f_1 \approx 1,3-1,4$ МГц, длительность импульса $\tau_1 = 500$ мкс, частота следования импульсов $F_1 = 50$ Гц. В качестве зондирующего устройства (а также для общего контроля состояния ионосферы) использовалась ионосферная станция [6]. Разрешающая способность по частоте составляла $0,02$ МГц в диапазоне частот $f = 0,5-2,1$ МГц. Наряду с хорошо известными эффектами зафиксированы некоторые описываемые ниже аномалии в поведении радиосигналов. Они появлялись преимущественно при первом в данном эксперименте включении мощного радиоизлучения с запаздыванием $\Delta t \approx 5-10$ мин и длились $\Delta T \sim 1-2$ мин. Величина эффекта, а возможно, и его появляемость определялись геофизической обстановкой.

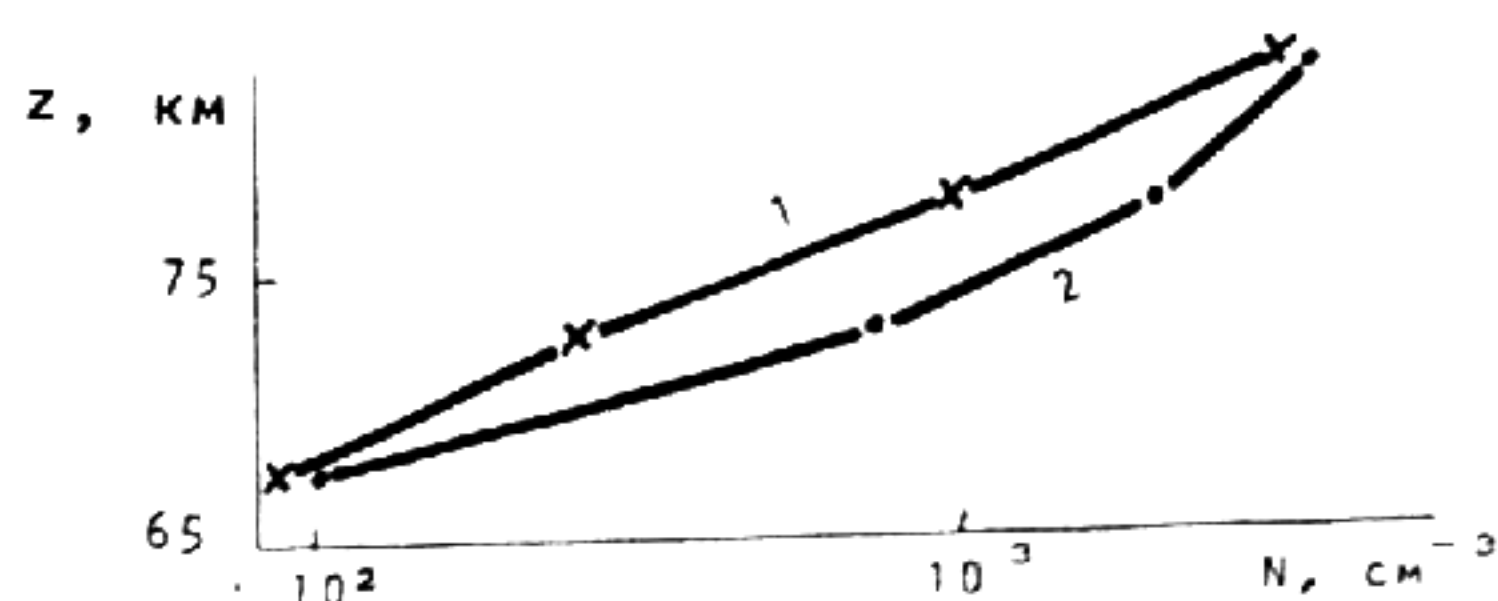
Для примера на рис. 1 приведена зависимость коэффициента кроссмодуляции, равного относительному изменению амплитуды зондирующего импульса, от времени для высоты встречи импульсов $z = 77,5$ км. Видно, что при $\Delta t \approx 4-10$ мин имеет место аномальное увеличение μ , которое примерно пропорционально концентрации электронов. Поскольку измерения μ выполнены для ряда высот, удалось проследить динамику профиля $N(z)$ (рис. 1а). Оказалось, что при $\Delta t \approx 5$ мин N увеличивается почти на 100% на высотах $z \approx 70-80$ км. При $\Delta t \geq 10$ мин возвращается практически к исходному состоянию (при $\Delta t < 4$ мин).

В этих экспериментах также замечено, что минимальная наблюдаемая на ионограммах частота f_{\min} могла увеличиться на $0,3 \pm 0,1$ МГц.

Отмеченные особенности имели место в 60% случаев в 28 экспериментах; в остальных сеансах нельзя уверенно утверждать ни об их наличии, ни об их отсутствии, так как доверительные интервалы перекрывались.



а



б

Рис. 1. Зависимость коэффициента кроссмодуляции от времени: $P_1 G_1 = 150$ МВт в импульсе, $f_1 = 1,35$ МГц, о - волна, $\tau_1 = 150$ мкс, $P_2 G_2 = 0,1$ МВт, $f_2 = 1,8$ МГц, $\tau_2 = 100$ мкс (Москва, 21.09.72)

Наблюдаемое увеличение N невозможно объяснить нагревом электронов и связанным с ним нарушением баланса ионизации, так как возмущение ионосферы осуществлялось импульсами длительностью $\tau \approx 500$ мкс, что существенно меньше времени становления N ($t_N \sim 100$ с для $z \sim 75-100$ км). Возмущение N в результате суммирования эффекта от отдельных импульсов не превышает нескольких процентов [8]. Подтверждением обнаруженного увеличения N служат эксперименты [9], проведенные на той же установке с использованием иного метода диагностики, в которых также получено $\Delta N/N \sim 100\%$ на высотах $z \approx 70-80$ км.

В декабре 1975 г. исследование возмущений велось при помощи метода частичных отражений [10,11]. Основные параметры диагностического комплекса следующие:

- эффективная мощность в импульсе $P_2 G_2 \approx 10$ МВт;
- диапазон частот $f_2 \approx 1,5-3,5$ МГц;
- длительность импульса $\tau_2 \approx 25$ мкс;
- частота следования импульсов $F_2 = 1$ Гц [7].

Нагревная установка [6] работала как в импульсном, так и в непрерывном режимах. В первом случае зафиксировано значительное увеличение интенсивности смеси сигнала I_c и шума $I_{\text{ш}}$. Важно, что на высотах $z \approx 77-85$ км рост этих параметров продолжался несколько минут и после выключения мощной установки, а затем наступала релаксация. Четко такой эффект наблюдался в трех из одиннадцати сеансов. Характерное время становления и релаксации интенсивностей составляло $\sim 100-10$ с для $z \approx 77-93$ км соответственно. Увеличение I_c , очевидно, обусловлено ростом градиента N , а следовательно и $\overline{\Delta N^2}$. Наблюдаемую величину возмущения, отсутствие корреляции с выключением мощной установки невозможно объяснить изменением температуры электронов T_e и скоростей реакций. Скорее всего появляется дополнительный источник ионизации. Для подтверждения этого в 1978 г. проведен эксперимент в высокоширотной ионосфере [12,13]. При этом ожидалось, что проявление предполагаемого источника ионизации окажется более сильным. Основные параметры греющей установки следующие:

- поляризация волны линейная;
- $P_1 G_1 \approx 5-10$ МВт;
- $f_1 = 3,3$ МГц;
- продолжительность возмущения, как и паузы, составляла 30 мин.

Диагностика велась при помощи передвижного комплекса [7] методом вертикального зондирования. В [12,13] описаны результаты обнаруженного аномального ослабления зондирующих сигналов, прошедших через возмущенную область. В первые минуты нормированная амплитуда A сигнала уменьшалась примерно вдвое. В трех сеансах она снизилась до 0,1. Такие эффекты наблюдались лишь при повышенной геомагнитной активности (индекс $\tau_H \geq 180$ нТ). Во всех сеансах уменьшение A четко коррелировало с включением мощного радиоизлучения. Связь его с выключением не обнаружена. Продолжительность аномального ослабления около 30 мин. Поскольку частота зондирующих сигналов $f_2 \approx 2$ МГц, то ослабление имело место в нижней ионосфере и, очевидно, связано с увеличением N до $\sim 100\%$. Статистическая обработка показала, что в контрольные дни такое ослабление сигнала отсутствовало.

Таким образом высокоширотные эксперименты подкрепили гипотезу о появлении дополнительного источника ионизации. Возникло предположение, что этот источник не является локальным. Для проверки этого в 80-х годах проведена серия экспериментов [14-18]. Средства диагностики располагались в районе г. Харькова, а возмущение производилось в окрестности г. Горького (расстояние $R \approx 900$ км) при по-

мощи установки [19]. Измерения велись с использованием метода частичных отражений [14,17], вертикального доплеровского зондирования [15,16], многочастотного зондирования на наклонных и квазивертикальных трассах в диапазоне частот $f_2 \sim 15$ кГц-15 МГц [15,16], а также вертикального зондирования [18]. Обнаружено, что существуют две группы возмущений: первые (апериодические) имеют запаздывание $\Delta t_1 \approx 10$ мин и четче проявляются в нижней ионосфере, вторые (квазипериодические) имеют $\Delta t_2 \approx 20-30$ мин, период $T \approx 5-20$ мин и наблюдаются, в основном, в области F. Вариации критических частот области F_2 и f_{min} в среднем равны $0,3 \pm 0,1$ МГц. Величина доплеровского смещения частоты $f_D \sim 0,2-0,5$ Гц при $f_2 \sim 3-5$ МГц. Интенсивность частично отраженного сигнала на высотах $z \approx 80-100$ км увеличивалась в 2-4 раза (иногда до 10 раз); $\Delta T \approx 1-2$ мин. Часто возникали кратковременные (~ 1 мин) вариации уровня шума. Воздействие мощного радиоизлучения обычно сопровождалось усилением многолучевости и возникновением слоя E_s .

Аналогичные эксперименты были проведены также с возмущающей установкой декаметрового диапазона, удаленной на расстояние $R \approx 700$ км, и двумя нагревными стендами гектометрового диапазона ($f_1 \approx 1,3-1,4$ МГц), находящимися на удалении $R \approx 700$ и 900 км от средств диагностики. Эффекты оказались в целом подобными.

Данные эксперименты подтвердили, что возмущения действительно являются нелокальными и распространяются на расстояния не менее 1000 км. Значительная часть экспериментов проводилась при условии, что $f_1 \ll f_{oF_2}$. Изучаемые эффекты наблюдались в большинстве экспериментов. Параметры возмущений зависели от геофизических условий и режима работы мощной установки.

Представляется полезным поиск аналогичных эффектов в других, нецеленаправленных экспериментах. Особый интерес представляют результаты исследований [20], выполненные в 70-е годы в среднеширотной ионосфере. Для возмущения использовалась установка ($P_1 G_1 \approx 10$ МВт, $f_1 \approx 9,9$ МГц), излучение которой длительностью 15 мин чередовалось с паузой такой же протяженности. Диагностика велась при помощи цифрового ($R \approx 28$ км) и двух аналоговых ($R \approx 50$ и 880 км) ионозондов. На ионограммах первого обнаружены следы слоя, находящегося ниже ~ 90 км. Время $\Delta t \approx 1-10$ мин. На других ионозондах на высотах $z \approx 96-100$ км наблюдался слой E_s . Описанный эффект проявлялся весьма редко. При $f_1 \approx f_{oF_2}$ в 36 экспериментах слой E_s зарегистрирован 16 раз, причем $\Delta t \approx 0,3-10$ мин. Интересно, что эффект возникал и ночью. По мнению автора, образование слоев может быть связано с высыпанием электронов из плазмосферы за счет их взаимодействия с ОНЧ сигналами, а также другими типами волн.

Заслуживают внимания результаты высокоширотных экспериментов, проведенных в 1976-1978 гг. в районе г. Мончегорска ($P_1 G_1 \ll 10$ МВт, $f_1 \approx 3,3$ МГц) [21-23].

В [21] на расстоянии $R \approx 70$ км от возмущающей установки обнаружено увеличение предельной частоты f_B слоя E_s до 5 МГц, продолжающееся не менее 20-25 мин (рис. 2). Величина запаздывания $\Delta t \approx 5-15$ мин; в 21% случаев $\Delta t \approx 0$. После выключения мощной установки слой исчезал в течение 1-10 мин. Как и в работе [20], отмечается, что лучшая корреляция появляемости и исчезновения слоя E_s с нагревом имела место при приближении f_1 к критической частоте области F_2 . В 42% случаев наблюдались изменения в естественном слое E_s , связанные с увеличением $f_B E_s$. Величина f_{min} менялась незначительно.

В работе [22] наблюдение за возмущениями осуществлялось при помощи двух ионозондов ($R \approx 0$ и 70 км). Для первого темп зондирования составлял 1 мин, для

Описанные выше эффекты наблюдались на частотах $f_2 \sim 1-10$ МГц. Для метровых радиоволн, по результатам работы [24], можно констатировать, что мощное радиоизлучение ($P_1 G_1 \approx 218$ МВт, $f_1 \approx 5,4$ МГц $< f_0 F_2$) высокоширотной установки, расположенной вблизи г. Тромсе, по-видимому, вызвало усиление флуктуаций амплитуды и фазы сигнала квазигеостационарного ИСЗ ($f_2 \approx 250$ МГц), проходящего через возмущенную область. Время запаздывания $\Delta t \approx 5$ мин для $R \approx 0$ (рис. 4). Авторы объясняют эффект возникновением неоднородностей с размером $l \approx 750$ м и $\Delta N/N \approx 3,4\%$, время генерации и распада которых $t_{\Delta N_1} \approx 0,5$ и $t_{\Delta N_2} \approx 2$ мин соответственно. Заметим, что $t_{\Delta N_1}$ существенно меньше $\Delta t \approx 5$ мин. Величина индекса мерцаний S_4 отличается в 3-4 раза в двух соседних сеансах (см. рис. 4). Кроме того, уменьшение величины флуктуаций начинается до окончания нагрева. Эти факты свидетельствуют о том, что наблюдаемые эффекты не сводятся только к генерации неоднородностей в области отражения мощной радиоволны. Можно предположить, что заметное увеличение S_4 при $\Delta t \approx 5$ мин вызвано увеличением N и, как следствие, флуктуаций ΔN в области F. Продолжительность этого эффекта составляет $\Delta T \approx 5-10$ мин.

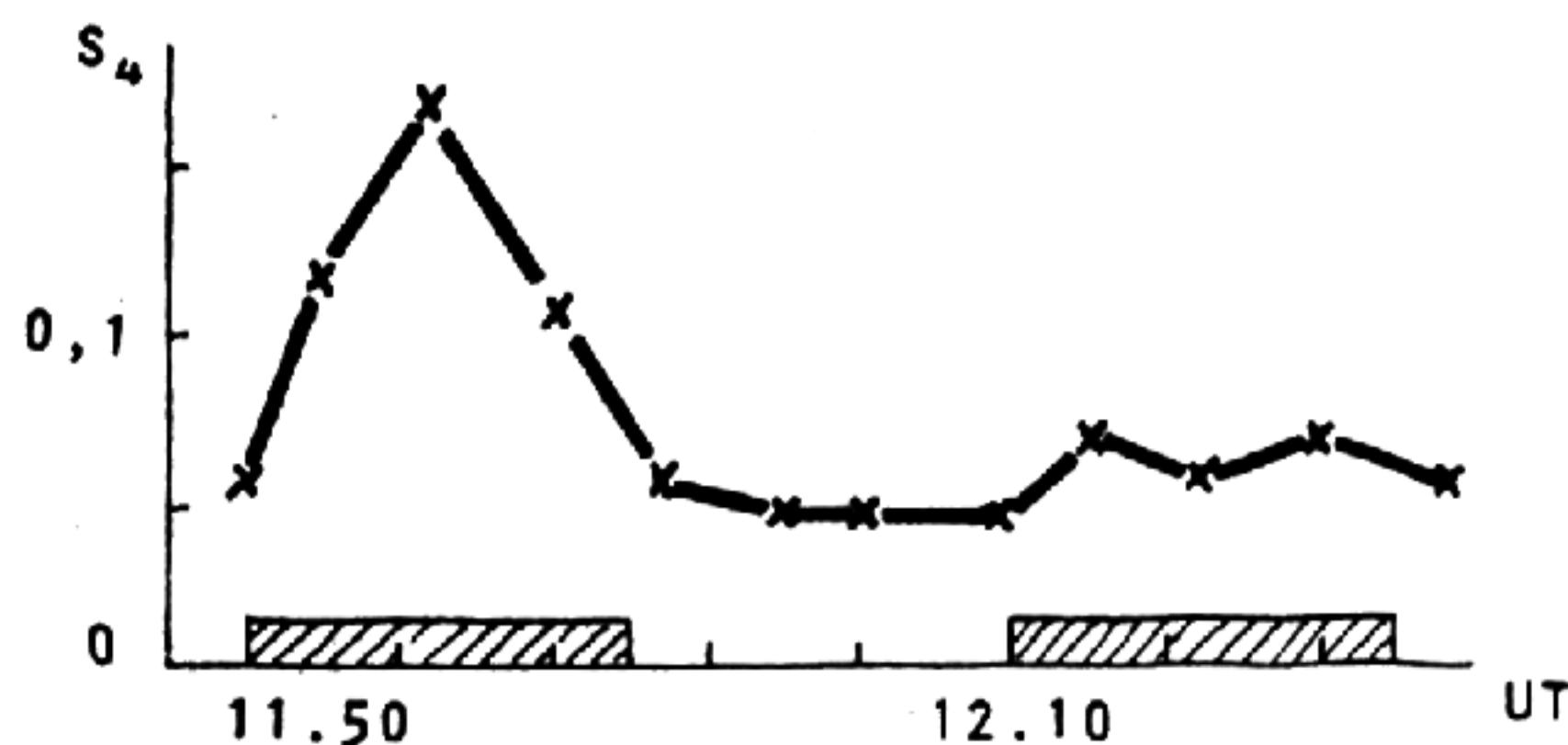


Рис. 4. Зависимость индекса мерцаний S_4 от мирового времени (UT) для 1.03.84

Анализ экспериментов

Воздействие мощного радиоизлучения сопровождается возникновением целого комплекса аномальных эффектов. К обнаруженным их проявлениям относятся следующие:

- образование слоев ионизации на высотах $z \leq 90-100$ км;
- генерация или усиление спорадического слоя E_s ;
- увеличение поглощения радиоволн с частотой $f \sim 1-10$ МГц;
- рост флуктуаций параметров сигналов в диапазоне частот $f \sim 1-250$ МГц;
- увеличение уровня ионосферных радишумов при $f \sim 1-10$ МГц;
- генерация волновых возмущений, имеющих скорость $v \sim 0,3-0,6$ км/с и период $T \approx 5-20$ мин.

Важно, что перечисленные процессы развивались через 1-10 мин после включения мощного радиоизлучения, могли закончиться до его выключения или же продолжаться (даже усиливаться) после прекращения воздействия источника возмущения. Эффекты наблюдались на удалениях не менее ~ 1000 км от нагревной установки. Их величина и появляемость существенно зависели от геофизической обстановки. Эти факты свидетельствуют о том, что мощное нестационарное радиоизлучение выступает в роли стимулятора естественных процессов.

Описанные выше эффекты можно объяснить привлечением гипотезы о стимулированном высыпании частиц, запасенных в околоземном космическом пространстве [13,20,

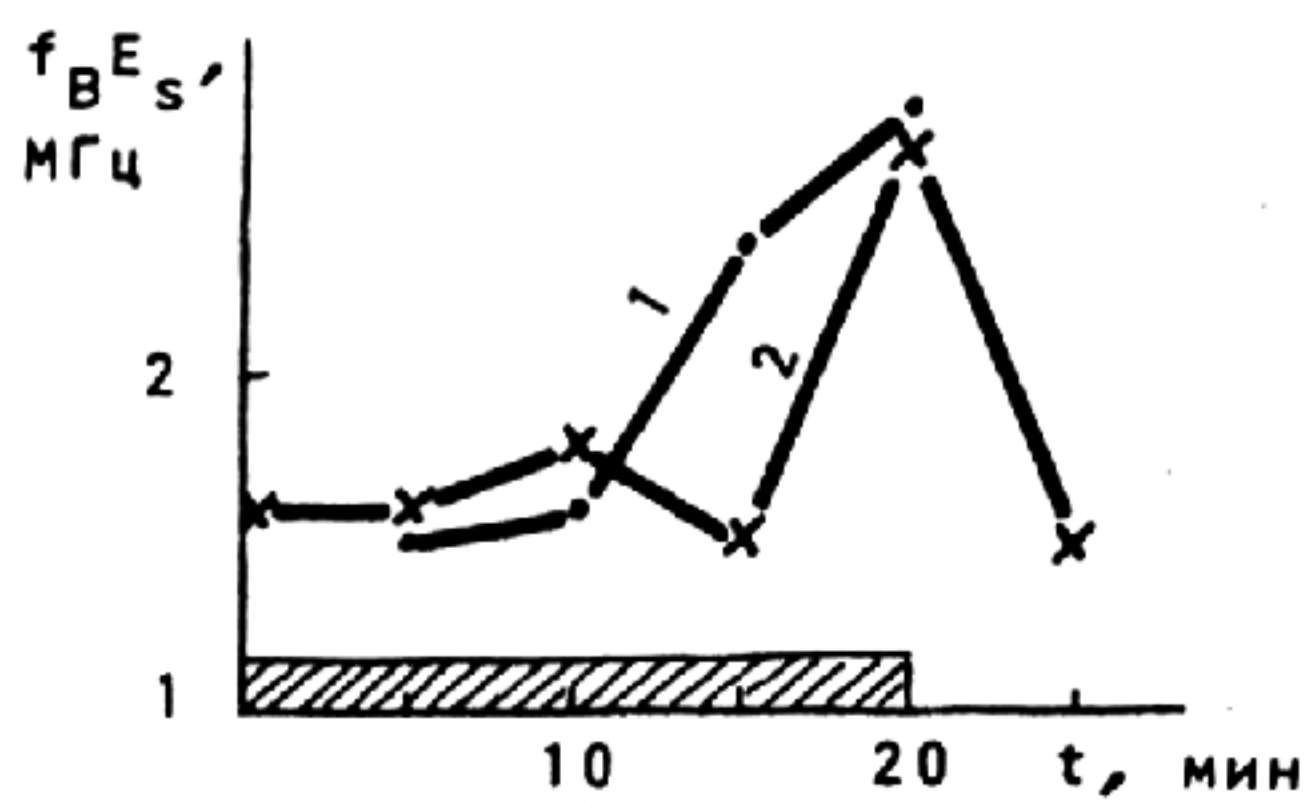


Рис. 2. Увеличение предельной частоты: 1 - 25.07.76; 2 - 1.08.76

второго - 15 мин. Обнаружено значительное ослабление сигналов, отраженных от F-области. Время запаздывания эффекта $\Delta t \approx 10-15$ мин; иногда ослабление наступало через несколько минут после включения мощной установки. Аномальный эффект уверенно наблюдался в 7 из 13 случаев. Важно, что вначале следы исчезали в области больших f_2 . Зафиксировано также значительное увеличение уровня шумов на всех

частотах ионозонда, возникающее с запаздыванием $\Delta t = 15$ мин. После выключения мощной установки их уровень резко уменьшался. По мнению авторов [22], наиболее вероятной причиной аномального ослабления является рассеяние зондирующих сигналов неоднородностями с масштабом $l < 100$ м, сильно вытянутых вдоль геомагнитного поля. Авторы также упоминают о возможности стимулированного высыпания энергичных частиц.

В работе [23] изучается рассеяние радиосигналов ($f_2 = 9,2-10,4$ МГц, $P_2 = 1$ кВт) на наклонной трассе длиной 320 км, средняя точка которой находилась на расстоянии $R \approx 22$ км от центра области ионосферы, подверженной воздействию мощного радиоизлучения. Важно, что $f_2 > f_{МПЧ}$. Мощный передатчик излучал в ночное время в течение 20 мин с паузами такой же продолжительности. Всего проведено 650 сеансов нагрева. В 22 случаях наблюдалась корреляция увеличения уровня рассеянного сигнала с включением возмущающей установки (рис. 3). В этих случаях также синхронно увеличивалось значение f_{VE_s} . Время задержки $\Delta t \approx 0-11$ мин, причем наиболее вероятное значение $\Delta t \approx 2$ мин. Интересно отметить, что амплитуда изменялась по квазипериодическому закону; величина $T \approx 5 \pm 1$ мин.

Авторы предполагают, что рассеяние возникло на изотропных неоднородностях, появляющихся на высотах $z \approx 80-90$ км в результате высыпания энергичных частиц из магнитосферы Земли. Сравнительно редкое проявление эффекта они связывают с воздействием мощной радиоволны на F-область при условии ее слабого поглощения в нижней ионосфере.

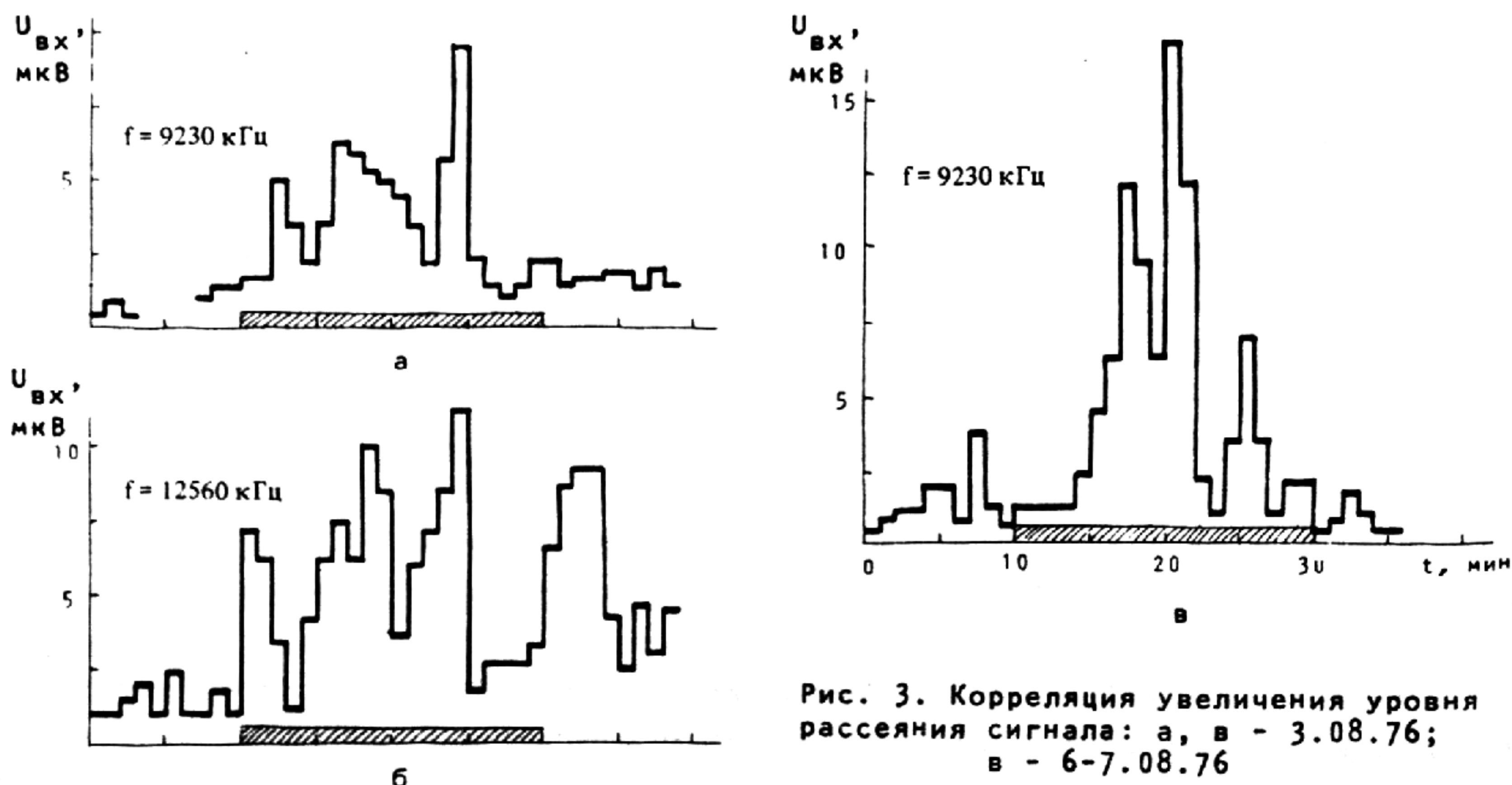


Рис. 3. Корреляция увеличения уровня рассеяния сигнала: а, в - 3.08.76; б - 6-7.08.76

22,23]. Известно, что вторгающиеся в атмосферу корпускулы вызывают увеличение электронной концентрации, особенно в нижней ионосфере, рост уровня шумового радиоизлучения в широком диапазоне частот (см., например, [25]), а также генерацию акустико-гравитационных волн с $v \sim 0,3-0,8$ км/с (см., например, [26]). Высыпание частиц не вызывает сомнения в высоких широтах. Что же касается среднеширотной ионосферы, то здесь также отмечается их далеко не очевидное проявление (см., например, [27]).

Стимулированному высыпанию частиц предшествует ряд процессов. Под действием мощного нестационарного радиоизлучения в результате суммирования возмущений от отдельных импульсов длительностью $\tau_1 < t_N$ ($t_N \sim 100$ с - время становления N) или при $\tau_1 > t_N$ происходит увеличение электронной концентрации N на высотах E области ионосферы. При этом возникает неоднородность проводимости ионосферы, что в присутствии внешнего ионосферного тока приводит к генерации низкочастотного электромагнитного излучения, связанного с ее поляризацией (см., например, [28]), которое достигает магнитосферы и вызывает перераспределение захваченных частиц по пич-углам, а также их высыпание. Последнее приводит к росту N , модуляции проводимости ионосферы и генерации упомянутых волн, то есть к усилению и повторению процесса первичного возмущения. Если размер зоны вторгающихся в ионосферу ($z \sim 100$ км) корпускул превышает размер первоначально возмущенной области, то должен иметь место распространяющийся за пределы диаграммы направленности антенны нагревной установки процесс за счет взаимодействия ионосфера-магнитосфера-ионосфера. В результате непрерывного подвода энергии из магнитосферы распространяющиеся возмущения слабо затухают, и тем самым они аналогичны хорошо известным автоволнам.

Очевидно, что при выключении мощной установки также возникает изменение проводимости ионосферы, способное привести к перечисленным процессам. В экспериментах их наблюдение затруднено, так как возмущения, связанные с включением и выключением мощного радиоизлучения, накладываются.

Описанным кратко механизмом взаимодействия ионосфера-магнитосфера-ионосфера можно объяснить эффективность излучения ОНЧ сигналов при воздействии мощных низкочастотных волн с длительностью импульсов в 120 с и паузой такой же продолжительности [29], а также особенности генерации геомагнитных пульсаций, изложенные в работе [30].

Выводы

Основные результаты анализа изложенных фактов сводятся к следующему.

1. Показана возможность возникновения крупномасштабных (~ 1000 км) возмущений в нижней ионосфере и F области, влияющих на распространение радиоволн гектометрового, декаметрового и, по-видимому, метрового диапазонов.

2. Время запаздывания возмущений порядка 1-10 мин для нижней ионосферы и около 20-30 мин для области F при удалениях от нагревной установки на расстояние порядка 900 км.

3. Ионосферные возмущения сопровождаются вариациями уровня шумового радиоизлучения ионосферы.

4. Наблюдаемый комплекс эффектов можно объяснить повторяющимся взаимодействием ионосфера-магнитосфера-ионосфера.

Л и т е р а т у р а

1. Савинова Т.А., Федоров В.Т., Шаронова Г.М. Воздействие мощным радиоизлучением на ионосферную плазму (1925-1979): Библиографический указатель. Горький, НИРФИ, 1980. 92 с.
2. Савинова Т.А., Федоров В.Т., Шаронова Г.М. Воздействие мощным радиоизлучением на ионосферную плазму (1979-1983): Библиографический указатель. Горький, НИРФИ, 1983. 70 с.
3. Савинова Т.А., Федоров В.Т., Шаронова Т.М. Воздействие мощным радиоизлучением на ионосферную плазму (1983-1986): Библиографический указатель. Горький, НИРФИ, 1986. 50 с.
4. Гуревич А.В., Шварцбург А.Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. М.: Наука, 1973. 272 с.
5. Gurevich A.V. Nonlinear Phenomena in the Ionosphere. Springer-Verlag. New York, Heidelberg, Berlin, 1978. 372 p.
6. Гуревич А.В., Шлюгер И.С. Исследование нелинейных явлений при распространении мощного радиоимпульса в нижних слоях ионосферы. Изв. вузов. Радиофизика, 1975, т. 18, № 9, с. 1237-1260.
7. Мисюра В.А., Шлюгер И.С., Часовитин Ю.К., Пивень Л.А., Черногор Л.Ф., Сомов В.Г. Техника, методика и результаты комплексных исследований нижней ионосферы / В респ. межвед. сб.: Космические исследования на Украине, 1974, № 5, с. 63-68.
8. Черногор Л.Ф. Интегральное возмущение ионосферы последовательностью мощных радиоимпульсов. Вестн. Харьков. ун-та. Сер. Радиофизика и электроника, 1978, № 163, с. 10-15.
9. Гуревич А.В., Милих Г.М., Шлюгер И.С. Изменение ионизации нижней ионосферы под действием мощных радиоволн. Изв. вузов. Радиофизика, 1977, т. 20, № 12, с. 1790-1804.
10. Мартыненко С.И., Мисюра В.А., Пивень Л.А., Сомов В.Г., Черногор Л.Ф., Шемет А.С. Возмущение неоднородной структуры и регулярных параметров нижней ионосферы на высоких и средних широтах мощным непрерывным и импульсным радиоизлучением. - В кн.: Эффекты искусственного воздействия мощным радиоизлучением на ионосферу Земли. (Материалы Всесоюзн. симпоз. Суздаль, сент., 1983). М., ИЗМИРАН, 1983, с. 94-95.
11. Черногор Л.Ф. Нестационарные процессы в ионосфере, возмущаемой мощным радиоизлучением: Тез. докл. 14-й Всес. конф. по распространению радиоволн. Ч. 1. М.: Наука, 1984, с. 117-120.
12. Гоков А.М., Мартыненко С.И., Мисюра В.А., Пивень Л.А., Сомов В.Г., Черногор Л.Ф., Шемет А.С. Исследование естественной и искусственной возмущенной мощным радиоизлучением нижней полярной ионосферы при помощи высокочастотного зондирования. В кн.: 2-е Всесоюзн. совещание по полярной ионосфере и магнитосферно-ионосферным связям: Тез. докл. Норильск, 1980. Иркутск, 1980, с. 32-33.
13. Мартыненко С.И., Мисюра В.А., Пивень Л.А., Сомов В.Г., Черногор Л.Ф., Шемет А.С. Ослабление высокочастотных радиоволн в искусственно возмущенной мощным радиоизлучением нижней высокоширотной ионосфере. Изв. вузов. Радиофизика, 1983, т. 26, № 1, с. 3-6.

14. Г р и т ч и н А.И., Г у б а р е в А.А., К о н ц е в а я Л.Г., М а р - т ы н е н к о С.И., М и с ю р а В.А., П и в е н ь Л.А., Ф и л е н к о И.А., Ч е р н о г о р Л.Ф., Ш е м е т А.С. Влияние крупномасштабных возмущений, вызываемых мощным коротковолновым радиоизлучением, на характеристики частично отраженных и проходящих радиосигналов. В кн.: Региональная науч.-техн. конф.: Тез. докл. Новосибирск, 1985, с. 9-10.

15. Г у б а р е в А.А., К о с т р о в Л.С., Л е у с С.Г., М и с ю р а В.А., П о х и л ь к о С.Н., Ч е р н о г о р Л.Ф. Об исследовании крупномасштабных возмущений в ионосфере. В кн.: Всесоюзн. симпоз. по солнечно-земной физике: Программа и тез докл. Иркутск, 1986, с. 105-106.

16. Г у б а р е в А.А., К о с т р о в Л.С., Л е у с С.Г., М и с ю р а В.А., П о х и л ь к о С.Н., Ч е р н о г о р Л.Ф. О возможности исследования возмущений нижней ионосферы по амплитудам и доплеровскому смещению частоты радиосигналов различных диапазонов. В кн.: 2-й Всесоюзн. симпоз. по результатам исследования средней атмосферы: Тез. докл. Москва, 1986, с. 72.

17. Г а р м а ш К.П., Г р и т ч и н А.И., М и с ю р а В.А., П и в е н ь Л.А., П о н о м а р е н к о П.В., Ч е р н о г о р Л.Ф., Ш е м е т А.С. Исследование возмущений нижней ионосферы методом частичных отражений. Там же, с. 60-61.

18. П а х о м о в а О.В., Ч е р н о г о р Л.Ф. Изучение методом вертикального зондирования реакции ионосферы на воздействие мощного радиоизлучения. Вестн. Харьков. ун-та. Сер. Радиофизика и электроника, 1988, № 318, с. 29-30.

19. Б е л о в И.Ф., Б е н е д и к т о в Е.А., Б ы ч к о в В.В., Г е т м а н - ц е в Г.Г., Е р у х и м о в Л.М., З ю з и н В.А., К о м р а к о в Г.П., М и - т я к о в Н.А., М о р о з о в В.И., Р а п о п о р т В.О., С м и р н о в А.А. Экспериментальный комплекс "СУРА" и первые результаты проведенных на нем исследований по нагреву ионосферы. В кн.: XIII Всесоюзн. конф. по распространению радиоволн: Тез. докл. Ч. 1. М., Наука, 1981, с. 103-106.

20. W r i g h t J.W. Evidence for Precipitation of energetic Particles by Ionospheric Heating Transmission. J. Geophys. Res., 1975, v. 80. 31, p. 4383-4386.

21. Р о й з е н А.М. Эффекты, наблюдаемые при вертикальном зондировании авроральной ионосферы, возмущенной мощным КВ излучением. В кн.: Исследование ионосферы и магнитосферы методами активного воздействия. Апатиты, 1977, с. 62-69.

22. Б а р д е е в И.Н., К а п у с т и н И.Н., К р а в ц о в А.Д., Р а с - п о п о в О.М., Р о й з е н А.М., У л ь я н ч е н к о А.А. О результатах наблюдений, проводимых при вертикальном зондировании области высокоширотной ионосферы, возмущенной мощным радиоизлучением. В кн.: Исследование процессов в авроральной ионосфере методами активного воздействия. Апатиты, 1978, с. 43-50.

23. П е р ц о в с к и й Р.А., Т к а ч е н к о Б.В. Экспериментальное исследование рассеяния радиосигнала от области ионосферы, подверженной воздействию мощного радиоизлучения. В кн.: Исследование ионосферы и магнитосферы методами активного воздействия. Апатиты, 1977, с. 49-54.

24. Basu Santimay, Basu Sunanda, Stubbe P., Kor-
ka H., Waarama J. Daytime Scintillations Induced by High-Power
HF Waves at Tromso, Norway. J. Geophys. Res., 1987, v. 92, N A10, p. 11149-
11157.

25. О с и п о в Н.К. Радиоизлучение авроральной ионосферы в диапазоне
коротких и ультракоротких волн. В кн.: Исследования по геомагнетизму,
аэронауке и физике Солнца. Иркутск, 1971, вып. 19, с. 45-65.

26. С о л о д о в н и к о в Г.К. Волновые возмущения в полярной ионосфере.
В кн.: Моделирование физических процессов в полярной ионосфере. Апатиты,
1979, с. 130-140.

27. Р о т е м г а Т.А., Z m u d a A.J. Precipitating Energetic Elect-
rons as an Ionization Source in the Mid-Latitude Nighttime D Region. J.
Geophys. Res., 1970, v. 75, p. 7161-7167.

28. Р о з у м е н к о В.Т., Ф и л е н к о И.А., Ч е р н о г о р Л.Ф. Возбуж-
дение низкочастотных электромагнитных волн при скачкообразном локальном
возмущении проводимости ионосферы. В сб.: Межведомственный семинар по
распространению радиоволн: Тез. докл. Красноярск, 1986, с. 22-24.

29. М о л ч а н о в О.А., М о г и л е в с к и й М.М., М а р к е е в а Ю.М.,
Р а с п о п о в О.М., Т и т о в а Е.Е. О возможности воздействия низкочас-
тотного передатчика на ОНЧ излучения. В кн.: Исследование ионосферы и
магнитосферы методами активного воздействия. Апатиты, 1977, с. 25-29.

30. Г у л ь е л ь м и А.В., З о т о в О.Д., К л а й н Б.И., Р у с а м
к о в Н.Н., Б е л я е в П.П., К о т и к Д.С., П о л я к о в С.В., Р а п о -
п о р т В.О. Возбуждение геомагнитных пульсаций при периодическом нагре-
ве ионосферы мощным КВ радиоизлучением. Геомагнетизм и аэронаука. 1985,
т. 25, № 1, с. 102-106.
