

УДК 551.510.535

О ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ ЭФФЕКТОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ МОЩНЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ НА ИОНОСФЕРНЫЙ F-СЛОЙ

Л. М. Ерухимов, В. А. Иванов, Н. А. Митяков, В. П. Урядов,
В. А. Фролов, В. В. Шумаев

Приводятся результаты исследования влияния искусственных ионосферных неоднородностей на характеристики ЛЧМ-сигналов при вертикальном и наклонном зондировании ионосферы. Приведена классификация эффектов, наблюдаемых на ионограммах ВЗ и НЗ ЛЧМ-ионозонда, обусловленных влиянием искусственных неоднородностей различного масштаба. Обнаружены особенности воздействия мощных пучков радиоволн на ионосферную плазму в условиях появления перемещающихся ионосферных возмущений.

Исследования модифицированной ионосферы проводились методами ее вертикального (ВЗ) и наклонного (НЗ) зондирования непрерывными ЛЧМ-сигналами с помощью аппаратуры, краткое описание которой приведено в работе [1]. Данная аппаратура позволила одновременно с ионограммами регистрировать амплитуды отраженных сигналов, разделяя их по модам распространения.

Эксперименты по ВЗ проводились в мае 1985 г. в п. Зименки Горьковской области. Возмущение ионосферы в этой серии экспериментов осуществлялось с помощью двух передатчиков, один из которых находился на расстоянии 1,5 км от ионозонда и работал на частоте $f_{н.я} = 5,75$ МГц с эффективной мощностью $PG \sim 20$ МВт, а второй — стенд «Сура» [2] — на расстоянии 120 км (г. Васильсурск). Стенд работал на частоте $f_{н.с} \approx 4,8$ МГц с $PG \sim 200$ МВт.

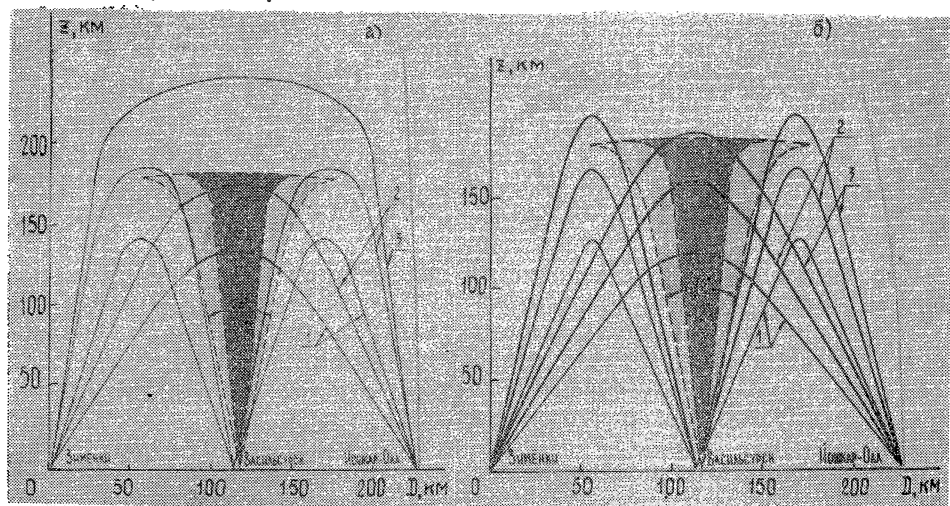


Рис. 1.

Эксперименты по НЗ проводились в феврале 1986 г. на трассе Зименки — Йошкар-Ола, протяженностью ~ 220 км. Модификация ионосферы здесь осуществлялась в вершине первого скачка с помощью стенда «Сура». Геометрия трассы и траектории лучей в проекции на

плоскость распространения для типичных ионосферных условий (критическая частота $f_{кр} = 5,8$ МГц, высота максимума слоя F_2 $h_m = 260$ км) показаны на рис. 1 для обыкновенной (рис. 1а: 1— $f = 3$ МГц, 2— $f = 5$ МГц, 3— $f = 5,82$ МГц) и необыкновенной (рис. 1б: 1— $f = 3$ МГц, 2— $f = 5$ МГц, 3— $f = 6$ МГц) компонент. Пунктиром на рисунке обозначен ход лучей от нагревного передатчика для частоты $f_{н.с.} = 4,785$ МГц.

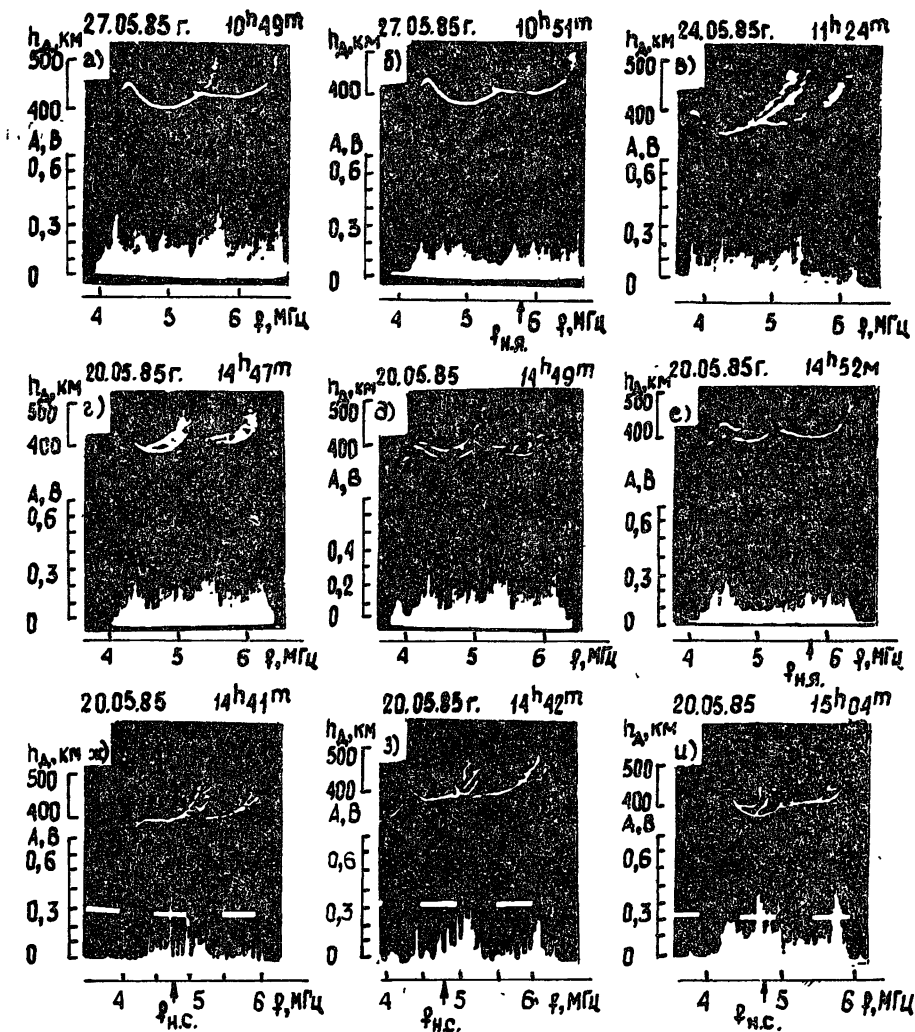


Рис. 2.

На рис. 2 приведены ионограммы ВЗ, отображающие ряд эффектов, наблюдавшихся при воздействии на F -слой ионосферы Земли мощным КВ радиоизлучением ближнего и удаленного передатчиков. В нижней части каждой ионограммы изображены частотные зависимости амплитуд $A(f)$ отраженных сигналов (не разделенные по модам распространения). Ионограмма, представленная на рис. 2а, характеризует спокойное состояние F -области ионосферы до начала воздействия на нее мощным радиоизлучением. Рис. 2б иллюстрирует наиболее типичное при ВЗ влияние мощного воздействия ближнего передатчика — исчезновение следа обыкновенной компоненты вследствие трансформации пробной волны в плазменную моду на мелкомасштабных искусственных неоднородностях (размеры l_{\perp} в плоскости, ортогональной силовым линиям геомагнитного поля, меньше длины волны возмущающего ионосферу передатчика, в данном случае $l_{\perp} \leq 60$ м).

Рис. 2 в—и иллюстрируют эффекты воздействия на ионосферу сигналами удаленного мощного передатчика: появляется второй след на ионограмме, обусловленный обратными отражениями пробного сигнала от возмущенной области ионосферы над этим передатчиком (эти сигналы назовем сигналами бокового отражения — СБО). На рис. 2е представлен результат воздействия на ионосферу сигналов двух мощных передатчиков одновременно.

В проведенных экспериментах большое внимание было уделено исследованиям эффектов возбуждения дополнительных следов СБО на ионограммах и их динамики. В основном отмечались дополнительные следы СБО двух типов: первый тип — параллельные друг другу следы (рис. 2г, д), второй тип — параллельные следы в более узком частотном диапазоне (рис. 2в). Эти следы возникали за время порядка 0,5—1 мин и исчезали за время порядка 3 мин. Очевидно, что первые из них можно объяснить появлением во всей толще нижней части F-слоя неоднородности в области с горизонтальными размерами, сравнимыми с размерами «пятна», высвечиваемого диаграммой направленности антенны нагревного стенда, а вторые — появлением неоднородностей в более узкой области высот. Если одновременно с удаленным греющим передатчиком работал ближний, то дополнительные следы либо маскировались искусственной диффузностью, либо исчезали (рис. 2е) из-за трансформации пробной волны в плазменную моду и рассеяния. Поскольку диаграммы направленности греющих передатчиков пересекались, то эффект «селективного» ослабления СБО может быть использован для пространственной локализации областей с мелкомасштабными неоднородностями (о преимущественном вкладе в данный эффект мелкомасштабных неоднородностей свидетельствует и малое время развития эффекта ослабления). Рис. 2ж—и показывают динамику развития множества следов СБО.

Для случаев воздействия на ионосферу сигналами ближнего передатчика нами были вычислены средние за несколько последовательных периодов воздействий и пауз значения амплитуд $\langle A_{нп} \rangle$ (индексы «н», «п» означают нагрев и паузу соответственно) пробных радиосигналов для различных частот из диапазона зондирования, а также среднеквадратичные отклонения $\sigma_{нп}$ сигналов в периоды нагревов и пауз. На рис. 3а приведены зависимости отношений

$$\eta_A = \langle A_{нп} \rangle / \langle A_{п} \rangle \text{ и } \eta_\sigma = \sigma_{нп} / \sigma_{п}$$

от частоты f зондирования ионосферы. Согласно рис. 3а $\eta_A(f)$ максимальное ослабление имеет место на частоте f_n , а его частотный интервал составляет $\Delta f = 500\text{—}600$ кГц. По величине Δf можно оценить толщину слоя, занятого неоднородностями, ответственными за аномальное ослабление пробной радиоволны, а следовательно, и высотный интервал, занятый неоднородностями, ответственными за трансформацию рассеяния и рефракцию отраженных сигналов. Действительно, если предположить, что в окрестности точки отражения волны накачки высотный профиль диэлектрической проницаемости определяется выражением $\epsilon = 1 - z/L$ ($z \leq L$), то толщина Δz слоя, занятого неоднородностями с масштабами $l_{\perp} < 60$ м, при $L \sim 100$ км будет составлять $\Delta z \sim 2L \Delta f / f_{пн} \sim 15\text{—}20$ км. Эта оценка примерно соответствует оценке, сделанной по ракурсному рассеянию коротких радиоволн [3].

Часто наряду с рассмотренным узкополосным ослаблением сигнала наблюдалась менее значительная по величине его широкополосная компонента, частотный диапазон которой составлял несколько мегагерц при отстройках частоты f пробного ЛЧМ-сигнала от частоты $f_{пн}$ волны накачки. Широкополосная компонента ослабления пробного ЛЧМ-сигнала достаточно хорошо заметна на рис. 3б, где приведены зависимости $A_{н}(f)$ (сплошные линии) для нескольких циклов воздействия и $A_{п}(f)$ (точки) для нескольких пауз.

Следует отметить, что если время развития узкополосного ослабления, как правило, меньше времени съемки одной ионограммы (30 с),

то широкополосное ослабление развивается за большой интервал времени. В частности, например, наблюдался эффект ослабления сигнала в диапазоне частот порядка 3 МГц, который развивался за время порядка 5—10 мин, т. е. за время развития наиболее крупных ($l_{\perp} \sim 10$ км) неоднородностей, вызывающих, по-видимому, ослабление сигнала за счет рефракционного отклонения траекторий отраженных сигналов.

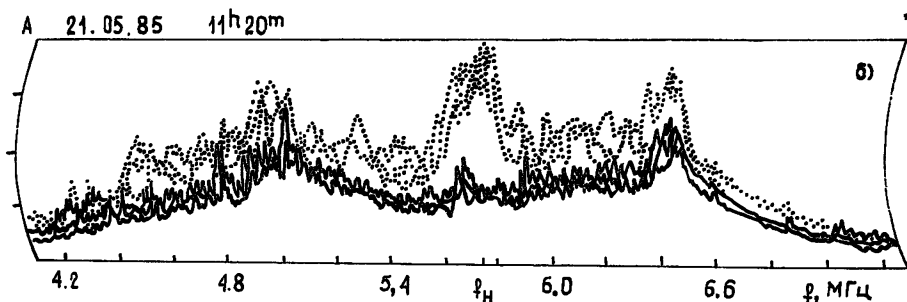
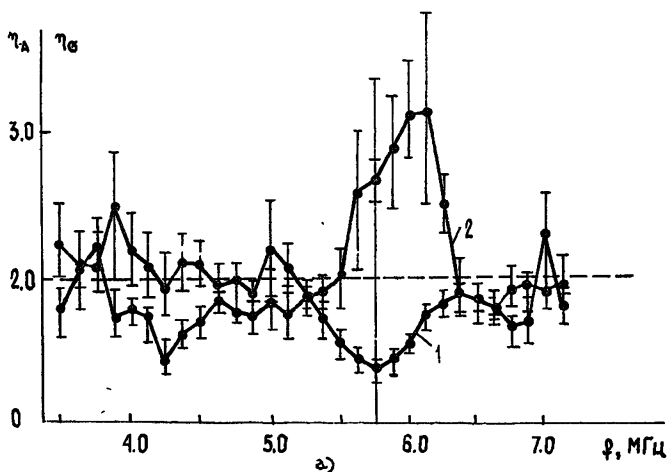


Рис. 3.

На рис. 3а $\eta_{\sigma}(2)$ приведены примеры частотных зависимостей отношения η_{σ} , которые характеризуют толщину слоя, занятого искусственными ионосферными неоднородностями с масштабами $l_{\perp} \geq 0,3-1$ км, ответственными за рассеяние пробных ЛЧМ-сигналов. В отличие от кривой $\eta_A(f)$ (1) зависимость $\eta_{\sigma}(f)$ (2) имеет экстремум на частоте $f_{кр} F_2$. Тот факт, что $\eta_{\sigma} > 1$ для диапазона частот 5,5—6,3 МГц, говорит об увеличении рассеянной компоненты в пробном сигнале на этих частотах. В соответствии с величиной, данного частотного диапазона можно заключить, что неоднородности, ответственные за увеличение флуктуаций пробных сигналов, сосредоточены в высотном диапазоне $\Delta z \geq 50$ км.

Весьма интересный и новый результат был получен 28 мая, когда в ионосфере наблюдался интенсивный спорадический слой E_s , экранирующий вышележащие слои. В этом эксперименте в нескольких последовательных циклах воздействия в первые минуты наблюдалось значительное увеличение амплитуды $A(f)$ пробных сигналов в диапазоне частот 2,3—7,1 МГц, и это увеличение носило колебательный характер. На рис. 4 в качестве примера приведены регистрации ненормированной амплитуды $A(f)$ на самописец для трех последовательных циклов воздействия, начало каждого отмечено на рисунках вертикальной чертой. Слева от черты приведены зависимости $A(f)$ для преднагревных пауз. Каждый импульс амплитуды здесь соответствует сканированию частоты зондирования от 2,3 МГц до 7,1 МГц со скоростью 300 кГц/с. Из рисунка хорошо виден колебательный характер изменения

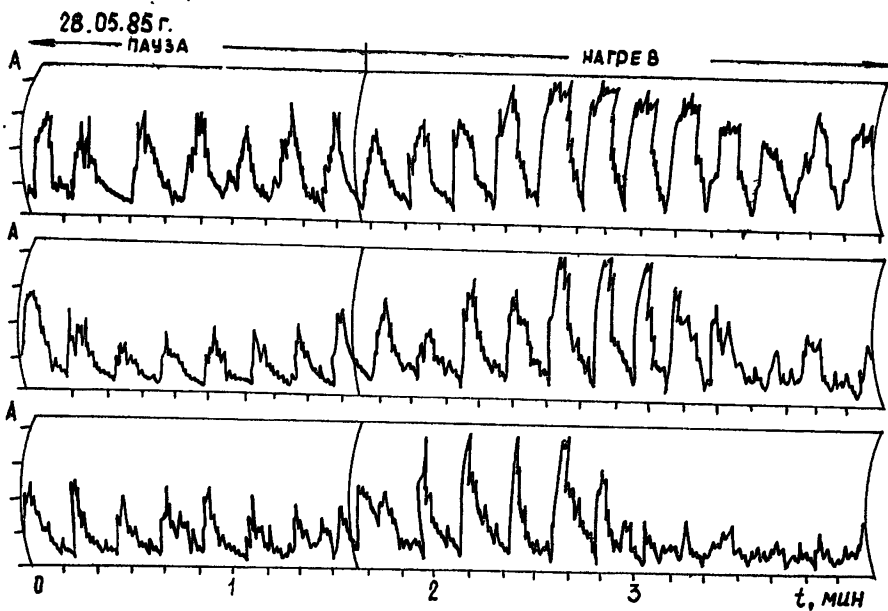


Рис. 4.

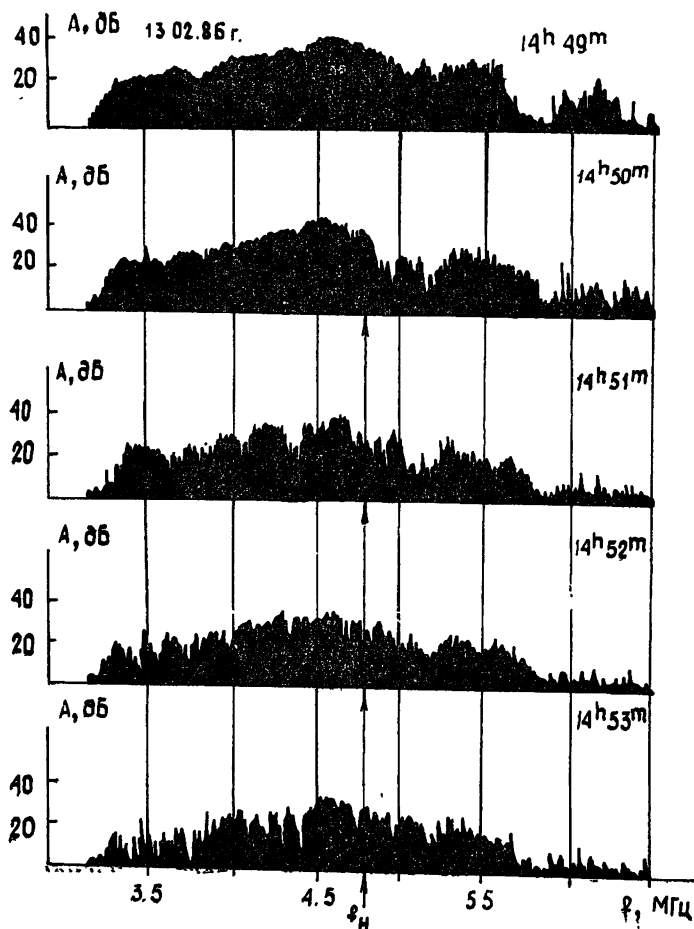


Рис. 5 (начало).

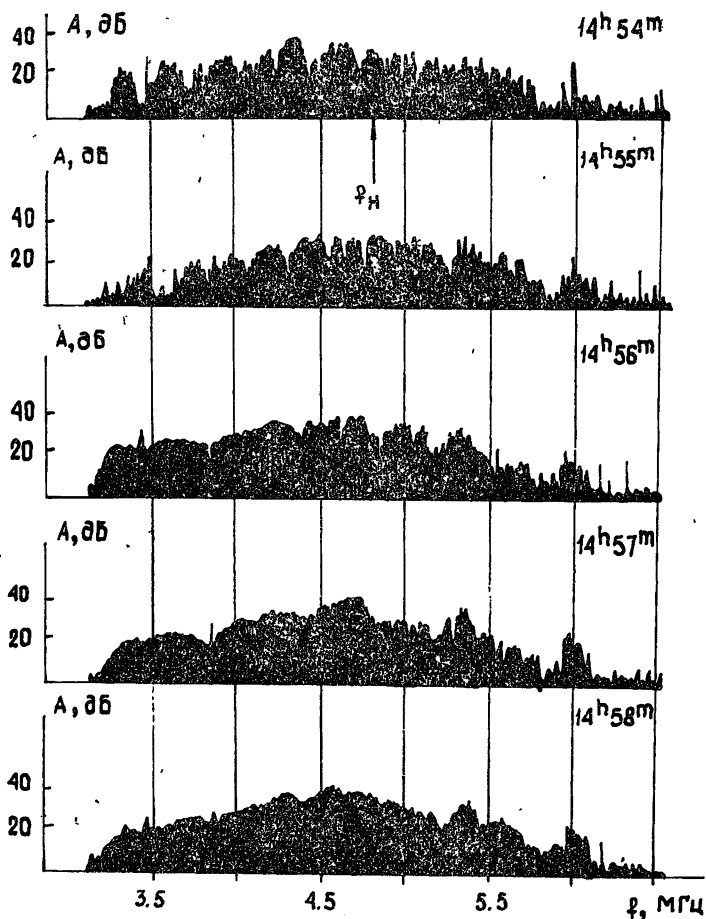


Рис. 5.

амплитуды. Период колебания составляет около 2 мин. В паузах между циклами воздействия амплитуды $A(f)$ пробных сигналов возвращались к «невозмущенному уровню». Природа этого явления в настоящее время неясна. Возможно, например, что при воздействии на слой E_s мощным КВ радиоизлучением происходит выталкивание плазмы из области отражения волны накачки и образуется плазменное зеркало, фокусирующее пробные сигналы.

При НЗ ионосферы типичным эффектом было ослабление амплитуды однокачковой моды пробного сигнала при воздействии на ионосферу в середине трассы мощным радиоизлучением. Иллюстрацией этого эффекта является рис. 5, на котором видна динамика его развития и релаксации. (Частота нагревного передатчика отмечена только на амплитудно-частотных характеристиках, зарегистрированных в периоды его работы.) Количественная оценка ослабления, полученная для ряда циклов «нагрев — пауза», представлена на рис. 6 (кривая 1 — мода 1F, 2 — мода 2F). Видно, что максимальной величины $\sim 4,5$ дБ эффект ослабления достигает на частотах $\sim 4-4,5$ МГц, которые отражаются на высотах 150—170 км (см. рис. 1). Согласно [4] именно на этих высотах имеет место увеличение концентрации электронов с ростом их температуры. Поэтому данный эффект, как и наблюдавшийся в настоящем эксперименте эффект ослабления необыкновенной компоненты, разумно связать с дефокусирующими свойствами области возмущения на высотах 150—170 км, который был обнаружен при ВЗ авторами [5].

На двухскачковой моде распространения в большинстве случаев наблюдался аналогичный эффект*. Однако иногда имеет место некоторое увеличение на 1—2 дБ амплитуды сигналов на частотах 3,2—4,3 МГц. Результаты обработки для одного из таких случаев представлены на рис. 6. Некоторое увеличение амплитуд сигналов на низких частотах мы связываем с влиянием нагрева на спорадический слой E, критические частоты которого по данным ВЗ были 3,2—3,5 МГц.

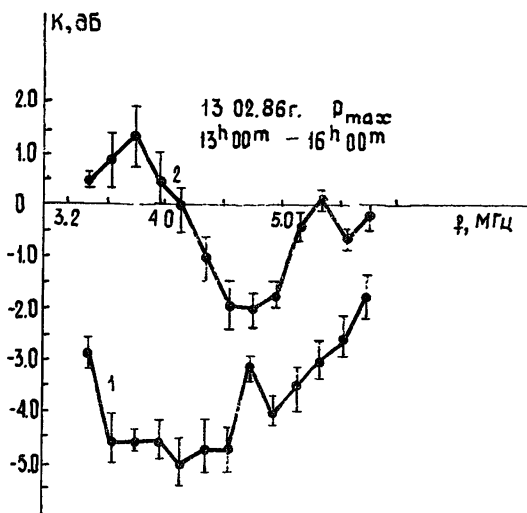


Рис. 6.

Заметим, что одновременно с ослаблением амплитуд сигналов односкачковой моды происходило увеличение частоты и глубины замираний при изменении зондирующей частоты, что хорошо видно на рис. 5. Здесь же можно заметить, что эффекты воздействия начинают развиваться на высотах отражения волны накачки, что проявляется в некотором увеличении флуктуаций и ослаблении амплитуды на частотах 4,8—5,2 МГц, а затем происходит увеличение флуктуаций и ослабление амплитуды на более низких зондирующих частотах. Оцененная по времени задержки сигнала эффективная вертикальная скорость агента возмущения составляет величину $v_{эфф\ ср} \geq 400$ м/с (см. также [6]). Теоретические оценки показывают, что эти флуктуации зависят от величин l_{\parallel} (продольного масштаба неоднородностей), которые согласно приведенным данным составляют 10—30 км.

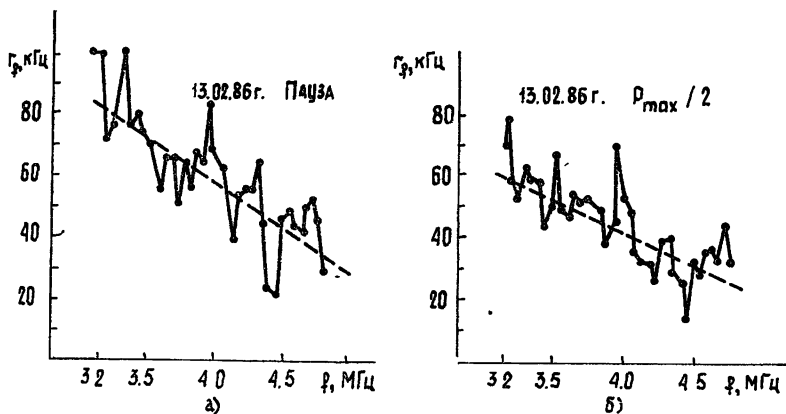


Рис. 7.

* Следует отметить, что по частотному эффекту воздействия мощного радионизлучения на амплитудные характеристики первой и второй моды можно оценить вертикальные и горизонтальные размеры области возмущения соответственно.

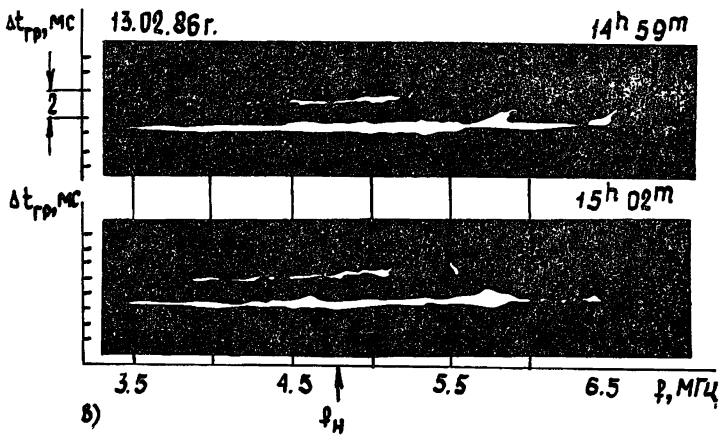
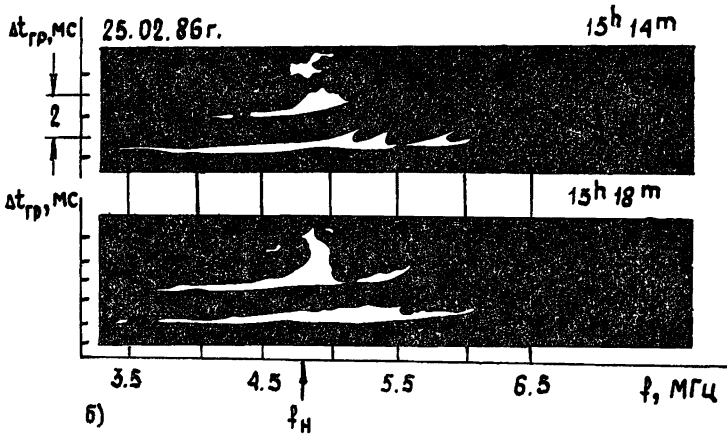
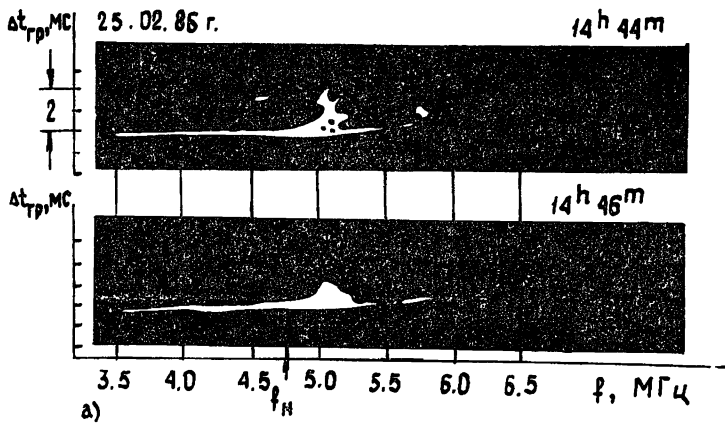


Рис. 8 (начало).

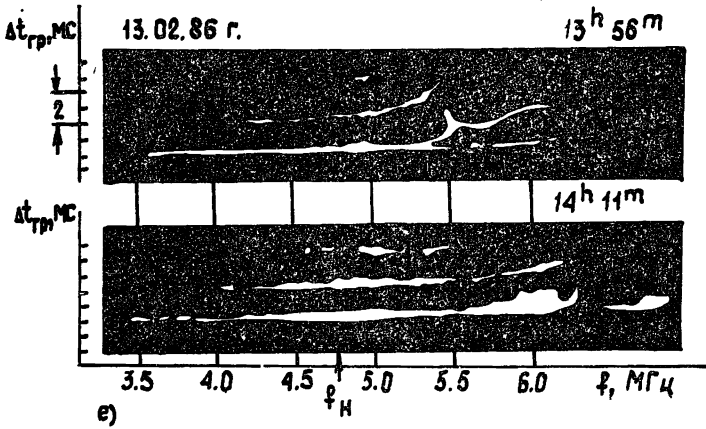
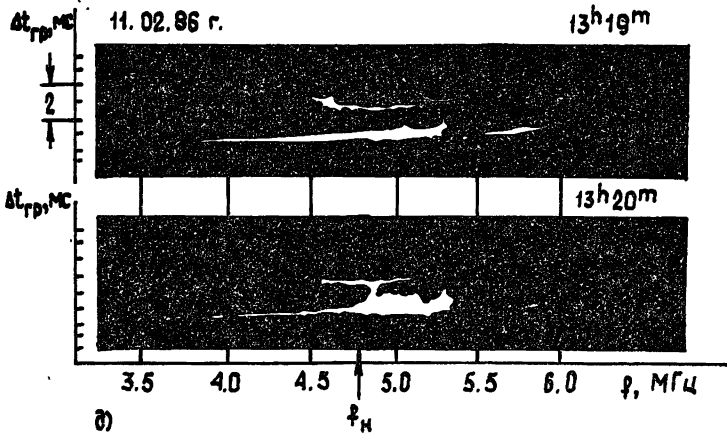
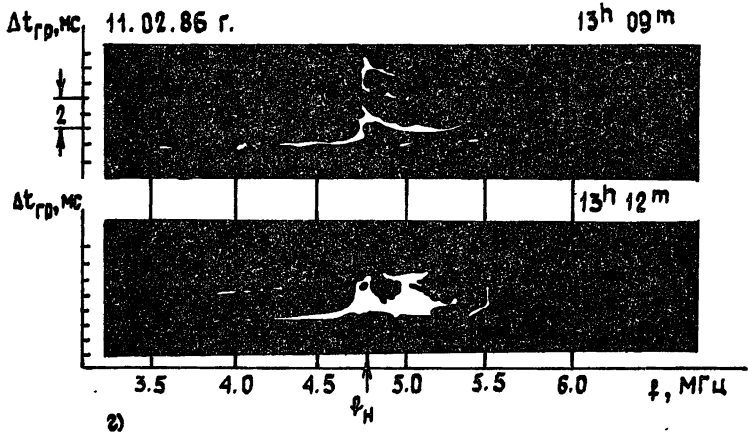


Рис. 8,

Результаты вычисления по полученным данным частотного радиуса корреляции r_f для 13 февраля 1986 г. (13—14 ч) представлены на рис. 7а для пауз и на рис. 7б — для периодов нагрева. Сопоставление их показывает, что с включением волны накачки частотный радиус корреляции в диапазоне 3—6 МГц уменьшался примерно в 1,5 раза.

В ряде случаев во время нагрева ионосферы наблюдалось усиление верхнего педерсеновского луча. Как показывают оценки, такое усиление может быть обусловлено переходом от скользящего (антиволноводного) распространения к распространению во флукуационном волновоме, образуемом искусственными крупномасштабными неоднородностями с размерами $l \sim 10$ км и относительными флукуациями концентрации $\Delta N/N \sim (2-5) \cdot 10^{-2}$, многократное рассеяние на которых в пределах области возмущения обеспечивает удержание энергии волны вблизи максимума слоя F_2 ионосферы.

Большое внимание было уделено исследованию влияния нагрева на ДЧХ трассы на частотах, близких к максимально наблюдаемой частоте (МНЧ). Проведенные эксперименты показали, что основной эффект здесь связан с возбуждением искусственной диффузности, которая проявлялась только при наличии ПИВ. При этом следует отметить, что величина и частотный интервал диффузности определялись появлением на ионограммах ПИВ.

Характерные примеры изменения ДЧХ при мощном воздействии на ионосферу приведены на рис. 8. Рис. 8а—в показывают увеличение диффузности на обыкновенной моде при незначительных ПИВ, когда диффузность занимала диапазон частот порядка 200 кГц и диапазон задержек 0,3 мс. Рис. 8б иллюстрирует влияние нагрева в присутствии ПИВ на сигналы вблизи МНЧ двухскачковой моды, когда диффузность увеличивалась почти до 1 мс. Рис. 8г—е соответствуют более значительным ПИВ. В этих случаях частотный диапазон диффузности больше, чем в предыдущих случаях. Обычно диффузность занимала диапазон частот от МНЧ, имевшей место перед появлением ПИВ, до МНЧ, обусловленной ПИВ (рис. 8а—д). Анализ динамики возникновения диффузности показывает, что диффузность возбуждается, когда ПИВ занимает на ионограмме ДЧХ место вблизи МНЧ.

Влиянием ПИВ на результаты воздействий вблизи МНЧ, по-видимому, объясняется нерегулярность эффектов, наблюдаемых другими экспериментаторами, проводившими исследования на фиксированных частотах. В этой связи нами было обращено внимание на ПИВ, занимающие узкий частотный интервал порядка десятков килогерц (меньше тех, которые представлены на рис. 8а—в), которые трудно разрешить с помощью обычной аппаратуры импульсного НЗ и которые были довольно частым явлением в проведенных нами наблюдениях. Дело в том, что возбуждаемая на их фоне диффузность создает иллюзию увеличения МНЧ на 100—150 кГц (см., например, рис. 8а, в), которое может быть интерпретировано как эффект фокусирующей линзы, возбуждаемой на высотах F -слоя. В связи с изложенным к интерпретации результатов увеличения МНЧ при нагреве следует подходить с особой осторожностью.

Диффузность, наблюдаемая на ионограммах НЗ, может быть обусловлена как трансформацией излучения в педерсеновские лучи, так и обратной перекачкой энергии верхних лучей в скачковую моду за счет рассеяния радиоволн на среднемасштабных неоднородностях с размерами $l \sim 1$ км (о чем свидетельствуют характерные времена релаксации диффузности $\sim 2-3$ минут). По частотному интервалу диффузности Δf_d представляется возможным оценить дисперсию углов $\Delta\theta$ на выходе слоя с неоднородностями и отвечающих им значения $\Delta N/N$. Согласно проведенным оценкам, для типичных значений $\Delta f_d \sim 100-200$ кГц дисперсия углов должна составлять $\Delta\theta \sim 2-4^\circ$, что может быть обусловлено неоднородностями с $l \sim 1$ км и $\Delta N/N \sim 10^{-2}$.

В заключение авторы выражают благодарность Р. Э. Эрм за проведение расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов В. А., Фролов В. А., Шумаев В. В. — Изв. вузов — Радиофизика, 1986, 29, № 2, с. 235.
2. Белов И. Ф., Бенедиктов Е. А., Бычков В. В., Гетманцев Г. Г. и др. Тезисы докладов XIII Всесоюзной конференции по распространению радиоволн. — М.: Наука, 1981, 1, с. 103.
3. Ерухимов Л. М., Метелев С. А., Митякова Э. Е. и др. В кн.: Тепловые нелинейные явления в плазме. — Горький: ИПФ АН СССР, 1979, с. 7.
4. Гуревич А. В., Шварцбург А. Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. — М.: Наука, 1973.
5. Бойко Г. Н., Васильков В. В., Голян С. Ф. и др. — Письма в ЖЭТФ, 1984, 39, вып. 11, с. 533.
6. Ерухимов Л. М., Митякова Э. Е., Мясников Е. Н. и др. — Изв. вузов — Радиофизика, 1977, 20, № 12, с. 1814.
7. Христоверсон П., Хагфорс Т. В кн.: Электронная концентрация в ионосфере и экзосфере. — М.: Мир, 1966, с. 109.

Научно-исследовательский
радиофизический институт,
Марийский политехнический
институт

Поступила в редакцию
24 сентября 1986 г.

ON FREQUENCY CHARACTERISTICS OF MODIFICATION EFFECTS IN IONOSPHERIC F-REGION CAUSED BY POWERFUL RADIATION

*L. M. Erukhimov, V. A. Ivanov, N. A. Mityakov, V. P. Uryadov, V. A. Frolov,
V. V. Shumaev*

Results are presented of influence of artificial ionospheric irregularities on characteristics of chirp-modulation signals at vertical and oblique ionospheric sounding. The effects observed on ionograms of vertical and oblique LFM ionosonde are classified according to the influence of artificial irregularities of different sizes. The peculiarities are found out of ionospheric plasma modification by powerful radiation for the case of traveling ionospheric disturbances.
