

Взаимодействие искусственных ионосферных неоднородностей с МГД волнами

А. В. Зализовский, П. В. Пономаренко, Ю. М. Ямпольский

Радиоастрономический институт НАН Украины
310002, Харьков, ул. Краснознаменная, 4

Статья поступила в редакцию 19 декабря 1997 г.

Приведены результаты экспериментов по резонансному рассеянию КВ сигналов на искусственных ионосферных неоднородностях, стимулированных мощным наземным “нагревным” КВ станцией. Обнаружен эффект модуляции интенсивности пробных сигналов с частотой наблюдавшихся во время экспериментов МГД волн естественного происхождения. Высказано предположение о том, что данный эффект вызван трансформацией энергии МГД волны в энергию мелкомасштабных ионосферных неоднородностей.

Наведено результати експериментів з резонансного розсіяння КХ сигналів на штучних іоносферних неоднорідностях, стимульованих потужним наземним “нагрівним” КХ станцією. Виявлено ефект модуляції інтенсивності пробних КХ сигналів з частотою МГД хвиль природного походження, що спостерігались під час експериментів. Робиться припущення про те, що це явище пов'язане з трансформацією енергії МГД хвиль в енергію іоносферних неоднорідностей.

Введение

На протяжении последних десятилетий исследователи ионосферы большое внимание уделяют экспериментам по управляемому воздействию на околоземную плазму мощной электромагнитной волной, что дает возможность рассматривать ионосферу как огромную естественную лабораторию. Возникающая при этом область искусственной ионосферной турбулентности (ИИТ) может использоваться как детектор крупномасштабных процессов в ионосфере и магнитосфере Земли, в частности, МГД волн, прохождение которых регистрируется на земной поверхности в виде геомагнитных пульсаций. Воздействие таких волн на ионосферную плазму проявляется в квазипериодических вариациях доплеровского смещения частоты (ДСЧ) пробных КВ сигналов, резонансно рассеянных мелкомасштабными неоднородностями как искусственного [1], так и естественного происхождения [2]. В некоторых работах сообщалось также о модуляции интенсивности пробных волн геомагнитными пульсациями [2]. Объяснение последнего эффекта может быть связано, например, с вариациями коэффициента поглощения КВ в нижней ионосфере под влиянием МГД волны [3]. В настоящей работе исследована модуляция мощности рассеянных ИИТ пробных КВ сигналов под воздействием геомагнитных пульсаций типа Pc3 и Pc4. Выдвинуто предположение о том, что такая модуляция происходит в результате нелинейного взаимодействия неоднородностей электронной

плотности с МГД волной, когда часть энергии крупномасштабной волны уходит на дополнительную турбулилизацию плазмы F области.

Схема эксперимента

В Радиоастрономическом институте НАН Украины во время весенних равноденствий 1993 и 1995 годов проводились измерительные кампании по резонансному рассеянию КВ на ИИТ. В этих экспериментах (рис. 1) область ИИТ возбуждалась нагревным станцией “Сура” (Научно-исследовательский радиофизический институт, Н. Новгород, Россия). Возмущение ионосферы производилось мощной электромагнитной волной с обыкновенной поляризацией на частотах несколько ниже критической частоты слоя F2. В результате вблизи точки отражения возникали искусственные ионосферные неоднородности, в том числе и мелкомасштабные.

Диагностика области ИИТ производилась по методике резонансного рассеяния с использованием излучения вещательных КВ радиостанций (диапазон 10÷20 МГц), расположенных вблизи Москвы (Россия). Кроме того, в 1995 г. использовались непрерывные и импульсные КВ сигналы специального исследовательского передатчика (СИП), расположенного на радиофизической обсерватории Харьковского госуниверситета (Гайдары, Харьковская обл., Украина). В соответствии с условиями Вульфа-Брэгга основной вклад

в рассеянное поле КВ сигнала с частотой f_0 дают ионосферные неоднородности с характерным размером l [4]:

$$l = \frac{c}{2f_0 \sin(\theta/2)},$$

здесь c – скорость света, θ – угол между волновыми векторами рассеянной и падающей волн. В описываемой геометрии измерений рассеяние происходило на большие углы, т. е. в нем участвовали мелкомасштабные неоднородности с $l \approx \lambda/2 \sim 10$ м.

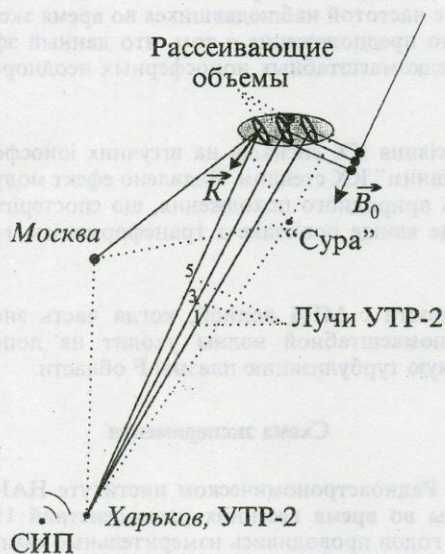


Рис. 1. Схема эксперимента

Прием сигналов, рассеянных ИИТ, велся при помощи высокостабильного многоканального когерентного приемно-измерительного комплекса (долговременная нестабильность частоты в КВ диапазоне около 0,01 Гц) [5]. Этот комплекс был оснащен остронаправленной приемной антенной – ФАР декаметрового радиотелескопа УТР-2 (Граково, Харьковская обл., Украина) – с угловым разрешением около 1 градуса в диапазоне частот 8÷30 МГц [6]. ФАР позволяла формировать несколько лучей диаграммы направленности, одновременное использование которых давало возможность исследовать сигналы, рассеянные пространственно разнесенными участками области ИИТ. Путем тройного преобразования несущая частота принятых сигналов приводилась к низкой промежуточной частоте 5÷10 Гц, затем сигналы регистрировались при помощи многока-

нального АЦП и подвергались цифровому анализу. Их мгновенная частота определялась по максимуму амплитудного спектра в скользящем прямоугольном временном окне, а интенсивность оценивалась как интеграл по частоте от спектра мощности.

Экспериментальные данные

Для исследования поведения интенсивности рассеянных сигналов при взаимодействии ИИТ с геомагнитными пульсациями были выбраны сеансы, в которых, во-первых, “Сура” в течение нескольких минут излучала непрерывный немодулированный сигнал на фиксированной частоте, и, во-вторых, наблюдались ярко выраженные квазипериодические вариации ДСЧ рассеянного сигнала, связанные с прохождением МГД волн.

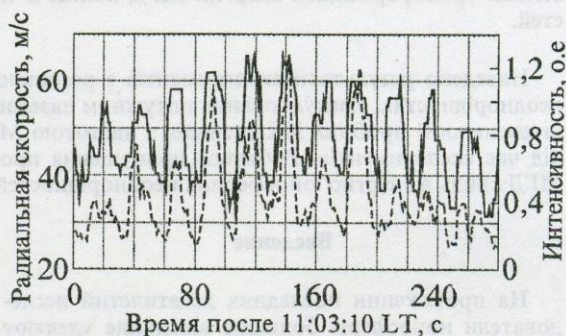


Рис. 2. Вариации радиальной скорости дрейфа неоднородностей и интенсивности пробного КВ сигнала, рассеянного на области ИИТ (13 марта 1993 года, сеанс 11:00 местного времени, частота 14 996 кГц, 1-й луч антенны “Север-Юг”):

— радиальная скорость, м/с;
 - - - - - интенсивность, о. е.

В результате обработки всего массива экспериментальных данных двух измерительных кампаний 1993 и 1995 годов в девяти сеансах – 5 раз во время существования геомагнитных пульсаций типа Pc3 и 4 раза во время пульсаций типа Pc4 – наряду с вариациями частоты были обнаружены квазипериодические вариации интенсивности рассеянных сигналов (рис. 2). Поведение взаимной корреляционной функции для частоты и мощности (рис. 3) свидетельствует о синфазности таких вариаций. В спектрах ДСЧ и интенсивности максимум проявляется на одной и той же частоте, причем в спектре интенсивности не удается увидеть более высоких модуляционных гармоник. Таким образом, интенсивность и ДСЧ рассеянного сигнала промодулированы одной и той же частотой. Следует также отметить, что во время разных измерительных сеансов эффект по-разному проявлялся в различных лучах антенны телескопа

УТР-2. Во время измерительного сеанса 13 марта 1993 года в 11:00 местного времени наблюдались геомагнитные пульсации типа Pс3, сопровождавшиеся синхронными вариациями ДСЧ, и вариации интенсивности пробных сигналов (рис. 4). Для этого сеанса были получены оценки амплитуд вариаций ДСЧ и коэффициента амплитудной модуляции пробного сигнала, который рассчитывался по формуле:

$$M = \frac{\langle A_{\max} \rangle - \langle A_{\min} \rangle}{\langle A_{\max} \rangle + \langle A_{\min} \rangle},$$

где A_{\max} , A_{\min} – соответственно максимальная и минимальная амплитуды рассеянного сигнала (табл. 1). Как видно из таблицы, для сеанса 11:00 13 марта 1993 г. наибольшая корреляция между вариациями частоты и интенсивности рассеянного поля наблюдается в 1-ом луче, более низкая – в 3-м, и наименьшая – в 5-м луче (рис. 4, табл. 1). «Неравномерность» модуляции интенсивности пробных КВ сигналов в разных лучах антенны наблюдалась и в других сеансах.

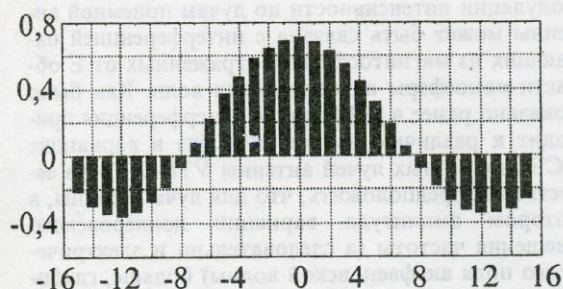


Рис. 3. Функция взаимной корреляции между вариациями скорости дрейфа неоднородностей и интенсивности рассеянного сигнала (13 марта 1993 г., 11:03:10, 1-й луч): по горизонтали отложено время в секундах, по вертикали – коэффициент корреляции

Таблица 1. Измеренные параметры пробного сигнала в различных лучах антенны радиотелескопа УТР-2 во время сеанса 11:00 13 марта 1993 года

Лучи антенны	1	3	5
Амплитуда вариаций доплеровского сдвига частоты, Гц	0,85	0,78	0,75
Радиальная составляющая поля МГД волны, мкВ/м	469	446	429
Коэффициент амплитудной модуляции (M)	0,45	0,33	0,17

ДСЧ, Гц

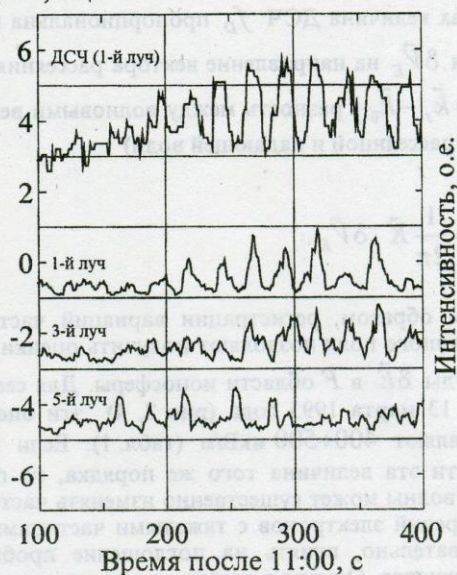


Рис. 4. Вариации доплеровского смещения частоты (ДСЧ) в первом луче и вариации интенсивности пробного сигнала в первом, третьем и пятом лучах антенны «Север-Юг» радиотелескопа УТР-2 для сеанса, изображенного на рис. 3

Интерпретация

Геомагнитные пульсации на ионосферных высотах существуют в виде МГД волн, которые, распространяясь через область ИИТ, взаимодействуют с ионосферными неоднородностями и проявляют себя в вариациях параметров пробных КВ сигналов. Модуляция их интенсивности может быть вызвана двумя основными причинами:

- 1) изменением коэффициента поглощения коротких радиоволн в нижней ионосфере под действием поля МГД волны [3];
- 2) изменением интенсивности неоднородностей, рассеивающих пробные сигналы.

Рассмотрим первую из них. Для «замороженной» плазмы области F ионосферы электрическое поле альфвеновских волн $\delta \vec{E}$ можно оценить по величине вызванных вариаций скорости $\delta \vec{V}_E$ поперечного к геомагнитному полю \vec{B}_0 дрейфа неоднородностей из известной формулы [7]

$$\delta \vec{V}_E = \frac{c}{B_0} \left[\delta \vec{E} \times \frac{\vec{B}_0}{B_0} \right]. \quad (1)$$

С другой стороны, измеряемая в наших экспериментах величина ДСЧ f_D пропорциональна проекции $\delta \vec{V}_E$ на направление вектора рассеяния \vec{K} ($\vec{K} = \vec{k}_s - \vec{k}_0$ – разность между волновыми векторами рассеянной и падающей волн)

$$f_D = \frac{1}{2\pi} \vec{K} \cdot \delta \vec{V}_E.$$

Таким образом, регистрации вариаций частоты рассеянного поля позволяют получить оценки амплитуды $\delta \vec{E}$ в F области ионосферы. Для сеанса 11:00 13 марта 1993 года (рис. 2, 4) эти оценки составляют 400–500 мкВ/м (табл. 1). Если в E области эта величина того же порядка, то поле МГД волны может существенно изменять частоты соударений электронов с тяжелыми частицами и, следовательно, влиять на поглощение пробных КВ сигналов. Однако в нашем случае эта гипотеза противоречит экспериментальным данным. Во-первых, в результате действия такого механизма вариации интенсивности должны были бы возникнуть во всех лучах приемной антенны, так как характерный горизонтальный масштаб альфвеновской волны около 1000 км, а расстояние между эффективными рассеивающими объемами, соответствующими разным лучам антенны УТР-2, порядка 10 км. Поскольку в эксперименте модуляция проявляется не во всех лучах, это свидетельствует об относительно небольших линейных размерах объема, в котором возникает эффект. Во-вторых, в спектре интенсивности должна возникнуть вторая гармоника модуляции ДСЧ, поскольку сдвиг частоты пропорционален электрическому полю МГД волны (1), а частота соударений электронов и соответственно коэффициент затухания КВ пропорциональны квадрату электрического поля. Мы же наблюдаем вариации интенсивности и ДСЧ с одним и тем же периодом (рис. 2, 4).

С другой стороны, интенсивность пробных сигналов может изменяться за счет вариаций интенсивности ионосферных неоднородностей, на которых происходит рассеяние. Действительно, в нашем случае удовлетворяются условия приближения однократного рассеяния (слабые относительные флуктуации концентрации плазмы), когда интенсивность рассеянных сигналов пропорциональна интенсивности неоднородностей [4]. Поэтому более правдоподобной выглядит гипотеза о возникновении модуляции интенсивности пробных КВ сигналов в результате трансформации части энергии МГД волны в энергию искусственных ионосферных неоднородностей. Напряженность электрического поля, приводящая к нагревной нелинейности плазмы (так называемое

плазменное поле), может быть оценена по формуле [8]:

$$E_p = \left[3T \frac{m}{e^2} \delta_0 (\omega^2 + \nu_{e0}^2) \right]^{1/2},$$

где E_p – напряженность электрического поля, мВ/м; T – температура плазмы, эВ; m – масса электрона, кг; e – заряд электрона, Кл; ω – циклическая частота поля; ν_{e0} – эффективная частота соударений электрона с молекулами и ионами; δ_0 – средняя доля энергии, теряемой электроном при одном соударении. Для типичных параметров плазмы F области при $\omega^2 \ll \nu_{e0}^2$ E_p составляет величину около 25 мкВ/м, что значительно меньше амплитуды электрической компоненты МГД волны (табл. 1). Следовательно, температура электронов в F области ионосферы существенно изменяется под действием поля МГД волны, в результате чего могут возникнуть условия для модуляции интенсивности неоднородностей.

В такой интерпретации “неравномерность” модуляции интенсивности по лучам приемной антенны может быть связана с интерференцией падающих из магнитосферы и отраженных от E области ионосферы альфвеновских волн. Как было показано ранее в [9, 10], такая интерференция приводит к различию амплитуд и фаз в вариациях ДСЧ для разных лучей антенны УТР-2. Тогда естественно предположить, что для луча антенны, в котором амплитуда вариаций доплеровского смещения частоты (а следовательно и электрического поля альфвеновской волны) больше, глубина модуляции интенсивности КВ должна быть выше. Как следует из табл. 1, экспериментальные значения амплитуды поля МГД волны и величина M максимальны в первом луче антенны, чуть меньше в третьем и слабее всего в пятом. Это подтверждает нашу гипотезу о возникновении модуляции интенсивности пробных сигналов благодаря изменению интенсивности неоднородностей F области ионосферы под действием поля МГД волны. Необходимо отметить, что для различных лучей приемной антенны относительная разность в амплитудах δE значительно меньше разности в коэффициентах амплитудной модуляции (табл. 1). Нелинейная связь между δE и M может быть вызвана пороговым характером механизма трансформации энергии МГД волны в интенсивность ионосферных неоднородностей.

В ряде случаев модуляция амплитуды пробных сигналов проявляется лишь в одном или двух лучах антенны и полностью отсутствует в остальных. Очевидно, что в разных частях области ИИТ при отсутствии МГД волн интенсивность неодно-

родностей неодинакова в силу неоднородного распределения поля волны накачки в пределах возмущенной области и разных условий взаимодействия волны накачки с плазмой при разных углах падения волны на ионосферу. Во время прохождения МГД волны во все участки возмущенной области наряду с высокочастотным полем волны накачки вносится и низкочастотное поле МГД волны, при этом модуляция интенсивности неоднородностей появляется лишь в отдельных частях области ИИТ. Исходя из этого можно предположить, что эффект зависит от суммарного электрического поля волны накачки и МГД волны и имеет пороговый характер.

Кроме того, в пользу идеи о "подкачке" интенсивности ионосферных неоднородностей полем МГД волны говорит и обнаруженный ранее эффект "эхо-рассеяния" [11], заключающийся в периодическом кратковременном усилении интенсивности пробных сигналов на стадии релаксации возмущенной области после выключения нагревного стенда. Период таких всплесков был близок к значению периода резонансных альфвеновских колебаний силовых линий для L-оболочки, соответствующей расположению "Суры". Этот эффект объясняется тем, что во время выключения нагревного стенда в пределах возмущенной области происходит генерация альфвеновского импульса. Этот импульс распространяется вдоль силовой линии магнитного поля и отражается от магнитосопряженной точки. Возвратившись в область релаксирующей ИИТ, он "подкачивает" ионосферные неоднородности, что проявляется в интенсивности пробного сигнала. Таким образом, эффект "эхо-рассеяния" также свидетельствует в пользу возможности обмена энергией между мелкомасштабной турбулентностью и альфвеновской волной.

Выводы

При исследовании рассеяния КВ сигналов в области искусственной турбулизации ионосферы мощным радиоизлучением наземного нагревного стенда обнаружена модуляция интенсивности рассеяния пробных сигналов под воздействием МГД волн естественной природы (геомагнитные пульсации типа Pc3 и Pc4). Анализ имеющихся в нашем распоряжении экспериментальных данных позволяет утверждать, что источник модуляции находится в слое F ионосферы и связан с областью искусственного возмущения. По-видимому, модуляция интенсивности рассеянных сигналов вызвана трансформацией части энергии МГД волны в интенсивность мелкомасштабных ионосферных неоднородностей. Вместе с этим следует отметить, что в работе изложены результаты лишь первич-

ного, качественного анализа. Более детальная теоретическая проработка экспериментального материала является следующим шагом наших исследований в этой области.

Авторы считают своим долгом поблагодарить коллектив сотрудников НИРФИ под руководством проф. Л. М. Ерухимова за приглашение к участию в измерительных кампаниях по модификации ионосферы, а также коллег из отделов дециметрового радиоастрономии Радиоастрономического института НАН Украины, предоставивших возможность использовать радиотелескоп УТР-2 в этих измерениях. Мы персонально признательны к. ф.-м. н. В. Г. Сеницыну за полезные советы и дискуссии, а также американским коллегам проф. М. Келли и доктору Д. Хайселлу, активно содействовавшим созданию современной системы сбора и обработки данных экспериментов. Диагностический пробный передатчик был создан и обслуживался сотрудниками Харьковского госуниверситета.

Литература

1. А. Ф. Беленов, П. В. Пономаренко, В. Г. Сеницын, Ю. М. Ямпольский. Изв. вузов. Радиофизика. 1993, 33, №12, с. 1089-1095.
2. Т. К. Yeoman, M. Lester, D. Orr, H. Luhr. Planet. Space Sci. 1990, 38, No. 10, pp. 1315-1325.
3. P. R. Sutcliffe. Planet. Space Sci. 1992, 40, No. 7, pp. 965-971.
4. С. М. Рытов, Ю. А. Кравцов, В. И. Татарский. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 2. Случайные поля. Москва, Наука, 1978, 463 с.
5. В. Г. Галушко, Л. М. Рабинович, Ю. М. Ямпольский. Препринт ИРЭ АН УССР. Харьков, 1981, № 182, 15 с.
6. С. Я. Брауде, А. В. Мень, Л. Г. Содин. Антенны. Сб. статей. Вып. 26. Москва, Связь, 1978, с. 3-15.
7. M. C. Kelley. The Earth's Ionosphere. Plasma Physics and Electrodynamics. Academic Press, Inc., 1990, 487 p.
8. А. В. Гуревич, Б. А. Шварцбург. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. Москва, Наука, 1973, 272 с.
9. В. С. Белей, В. Г. Галушко, А. В. Зализовский, П. В. Пономаренко, Ю. М. Ямпольский. Геомагнетизм и аэрономия. 1997, 37, №6, с. 91-98.
10. V. G. Sinitsin, M. C. Kelley, Yu. M. Yampolski, D. L. Hysell, A. V. Zalozovski, P. V. Ponomarenko. R. Sci. (to be published).
11. Ю. М. Ямпольский. Изв. Вузов. Радиофизика. 1989, 32, № 4. с. 519-521.

Interaction between Artificial Ionospheric Irregularities and MHD Waves

A. V. Zalizovski, P. V. Ponomarenko,
Yu. M. Yampolski

Experimental results on HF signal scattering by artificial ionospheric inhomogeneities stimulated by

powerful ground-based HF "heating" facility are presented. An effect of intensity modulation in the probe signals with frequency of simultaneously observed natural MHD waves has been detected. It is supposed that the effect was produced by the transformation of the MHD wave energy into the energy of small-scale ionospheric irregularities.

Литература

1. А. Ф. Белюк, И. В. Пономаренко, В. В. Сидоренко, Ю. М. Ямпольский. *Изв. вузов. Радиофизика*, 1993, 33, №12, с. 1089-1092.
2. T. K. Yeoman, M. I. Hines, D. Orr, H. I. Hines. *Planet. Space Sci.* 1990, 38, No. 10, pp. 1315-1325.
3. P. R. Standaert. *Planet. Space Sci.* 1992, 40, No. 1, pp. 667-671.
4. С. М. Рытов, Ю. А. Крайнов, В. Н. Титаров. *Известия в статистической радиологии*, Р. 2. Справочное поле. Москва, Наука, 1972, 483 с.
5. В. Т. Талашко, Л. М. Рабинович, Ю. М. Ямпольский. *Известия ИГиРФИ НАН УССР*, Харьков, 1981, № 182, 15 с.
6. С. Р. Брайан, А. В. Манн, Д. Т. Содли. *Антенны СВ* статьи. Вып. 26. Москва, Связь, 1972, с. 3-12.
7. M. C. Kelley. *The Earth's Ionosphere: Physics and Electrodynamics*. Academic Press, Inc., 1989, 487 p.
8. A. S. Tyunin, B. A. Il'inskiy. *Механика теория распространения радиоволн в ионосфере*. Москва, Наука, 1973, 272 с.
9. В. С. Белюк, В. Т. Талашко, А. В. Ямпольский, П. В. Пономаренко, Ю. М. Ямпольский. *Изв. вузов. Радиофизика и электроника*, 1997, 37, №6, с. 91-98.
10. V. G. Stenflo, M. C. Kelley, Yu. M. Yampolski, D. L. Hysell, A. V. Zalizovski, P. V. Ponomarenko. *R. Sci.* (to be published).
11. Ю. М. Ямпольский. *Изв. вузов. Радиофизика*, 1989, 32, № 4, с. 219-221.

Выводы

При искусственном рассеянии КВ сигналами в области возбуждения турбулентных неоднородностей малым радиомощным излучением наблюдается эффект обнаружения модовых интенсивностей в области пробных сигналов под воздействием МДВ. Вспомогательной причиной (геометрические факторы) являются уменьшение в направлении излучения экстремальных данных. Это позволяет утверждать, что излучение модовых волн в слое F ионосферы и связь с областью возбуждения турбулентности. По-видимому, модовая интенсивность рассеянных сигналов связана с трансформацией энергии излучения МДВ волны в интенсивность маломасштабных неоднородностей. Вместе с этим следует отметить, что в работе не были получены результаты лишь первая