

УДК 550.388.2

РАДАРНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ F -РАССЕЯНИЯ В СРЕДНЕШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЕ С ПОМОЩЬЮ ИОНОЗОНДА-РАДИОПЕЛЕНГАТОРА

В. П. Урядов¹, Г. Г. Вертоградов², Е. Г. Вертоградова²

¹ Научно-исследовательский радиофизический институт, г. Нижний Новгород;

² Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Представлены результаты экспериментальных исследований явления F -рассеяния в среднеширотной ионосфере, полученные с помощью широкополосного коротковолнового радара бистатической конфигурации для сигналов с линейной частотной модуляцией на трассе наклонного зондирования Кипр—Ростов-на-Дону. В вечерние, ночные и ранние утренние часы зимних и весенних месяцев в условиях спокойной геомагнитной обстановки обнаружены рассеянные сигналы на частотах, превышающих максимальную наблюдаемую частоту моды $1F$ прямого сигнала, со следующими параметрами: задержки от $6 \div 7,5$ до $8,5 \div 11$ мс, частоты от $10 \div 14$ до $13 \div 19$ МГц, углы прихода $20^\circ \div 45^\circ$ относительно горизонта, азимуты прихода $-30^\circ \div 50^\circ$, амплитуда рассеянного сигнала была на $70 \div 80$ дБ меньше амплитуды прямого сигнала. На основе моделирования распространения и рассеяния радиоволн и сопоставления с экспериментальными данными установлено, что наблюдаемый аномальный сигнал обусловлен обратным рассеянием радиоволн на мелкомасштабных неоднородностях плазмы ионосферы с размерами порядка $8 \div 10$ м, занимающих протяжённую область среднеширотной ионосферы ($50^\circ \div 55^\circ$ с. ш, $35^\circ \div 48^\circ$ в. д.) на высотах как ниже, так и выше максимума F -слоя ($250 \div 450$ км). Сделана оценка относительных флуктуаций электронной концентрации рассеивающих неоднородностей $\delta N \approx 7,8 \cdot 10^{-3}$, что примерно в $3 \div 5$ раз превышает величину естественных флуктуаций электронной концентрации для обычных условий в F -области среднеширотной ионосферы. Обсуждается возможная связь F -рассеяния с перемещающимися ионосферными возмущениями.

ВВЕДЕНИЕ

Исследованию рассеяния радиосигналов в F -области ионосферы посвящено большое число экспериментальных и теоретических работ (см., например, [1–4] и цитируемую там литературу). Наличие протяжённого по задержке и частоте сильно диффузного отражённого сигнала на ионограмме вертикального зондирования (F -рассеяние) было обнаружено в середине 30-х годов 20-го века в первых исследованиях ионосферы с помощью ионозондов вертикального зондирования [5]. Это явление наблюдалось ещё до обнаружения перемещающихся ионосферных возмущений и объяснялось за счёт рассеяния радиоволн на мелкомасштабных неоднородностях. С обнаружением перемещающихся ионосферных возмущений в 40-х годах 20-го века [6, 7] и с использованием в дальнейшем техники вертикального зондирования с высоким частотным и временным разрешением была установлена важная роль атмосферных гравитационных волн и их ионосферного отклика в виде перемещающихся ионосферных возмущений в образовании явления F -рассеяния [8].

С развитием техники когерентного и некогерентного рассеяния [9–11] появилась возможность проводить целенаправленные эксперименты с целью выявить особенности F -рассеяния в различных геофизических условиях. В последние годы много внимания уделяется исследованию экваториального F -рассеяния [12–16]. Это связано с установкой нового оборудования (радаров, приёмников GPS и других систем) в Индии, Бразилии и Африке.

Происхождению сложного явления F -рассеяния в среднеширотной ионосфере пока нет удовлетворительного объяснения. Поскольку модель среднеширотных мерцаний всё ещё недостаточно развита (в том числе из-за недостатка данных спутниковых наблюдений и радарных измерений), то новые данные о F -рассеянии в среднеширотной ионосфере могут внести существенный

вклад в это направление ионосферных исследований. В частности, мало известно о вероятности появления F -рассеяния в зависимости от времени суток, сезона, широты и др. Трудности исследования F -рассеяния обусловлены спорадическим характером этого явления, что требует систематических наблюдений с использованием различных средств диагностики.

Несмотря на значительные достижения в изучении F -рассеяния, многие вопросы ещё ждут своего решения, в том числе возможные механизмы образования F -рассеяния. В работах [4, 17] развивается представление, что за пространственный тип F -рассеяния (рассеяние по дальности) ответственен механизм наклонного зеркального отражения от волнообразных среднемасштабных структур типа перемещающихся ионосферных возмущений, когда на ионограммах вертикального зондирования регистрируются треки, параллельные основному следу, в совокупности формирующие такой тип F -рассеяния. С другой стороны, ещё до обнаружения перемещающихся ионосферных возмущений, рассматривался механизм рассеяния на мелкомасштабных неоднородностях, ответственный за явление F -рассеяния [5].

В связи с этим исследование F -рассеяния с помощью новой техники наклонного зондирования с использованием ионозонда-радиопеленгатора в качестве широкополосного коротковолнового радара, на наш взгляд, представляет интерес для более полного понимания механизмов, ответственных за формирование таких структур, особенно в среднеширотной ионосфере, где таких исследований очень мало (см., например, [3, 4]).

В работе представлены новые результаты изучения среднеширотного F -рассеяния, полученные с помощью широкополосного коротковолнового бистатического радара на трассе зондирования Кипр—Ростов-на-Дону, когда в приёмном пункте использовался ионозонд-радиопеленгатор, позволяющий в реальном времени одновременно измерять ключевые параметры ионосферного канала (амплитудно-частотные, дистанционно-частотные и угловые частотные характеристики) во всём диапазоне частот прохождения коротких радиоволн [18, 19].

1. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследования явления F -рассеяния проводились в период с января 2011 года по январь 2012 года включительно. Передатчик на Кипре работал в диапазоне частот $8 \div 30$ МГц, скорость перестройки частоты составляла 100 кГц/с. Приём сигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) осуществлялся в Ростове-на-Дону с помощью ионозонда-радиопеленгатора. В качестве приёмной антенны использовалась антенная решётка, состоящая из 16 вертикальных 9 -метровых штырей, расположенных на площадке с размерами 100×100 м. Ионограммы снимались каждые 5 мин. В ряде случаев на ионограммах наклонного ЛЧМ-зондирования на трассе Кипр—Ростов-на-Дону регистрировались сильно диффузные сигналы на частотах, превышающих максимальную наблюдаемую частоту моды $1F$ прямого сигнала.

На рис. 1–6 показаны характерные примеры записей амплитудно-частотных, дистанционно-частотных и угловых частотных характеристик, иллюстрирующие динамику развития такого рассеянного сигнала PC1, регистрируемого в течение длительного времени с $21:30$ MSK 04.01.2012 до $06:15$ MSK 05.01.2012. Рисунок 1 соответствует начальному периоду появления рассеянного сигнала. Рисунки 2–4 соответствуют периоду развитого устойчивого рассеянного сигнала PC1 (примерно с $22:00$ MSK 04.01.2012 до $05:30$ MSK 05.01.2012). Рисунки 5, 6 соответствуют периоду постепенного исчезновения рассеянного сигнала PC1.

Согласно результатам измерений, параметры рассеянного сигнала PC1 в период развитого состояния в среднем следующие: диапазон задержек $6 \div 7,5$ мс при рассеянии от нижней части рассеивающей области и $8,5 \div 11$ мс при рассеянии от верхней части, диапазон частот $10 \div 14$

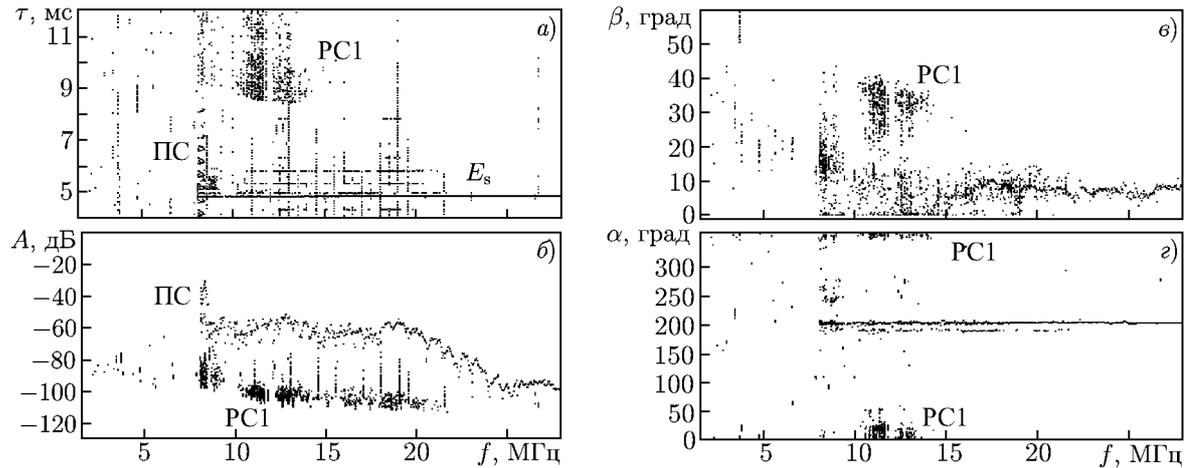


Рис. 1. Дистанционно-частотная (а), амплитудно-частотная (б) и угловые частотные (в и г) характеристики распространения радиоволн на трассе Кипр—Ростов-на-Дону 21:49 MSK 04.01.2012. Здесь τ — задержка сигнала, A — амплитуда, β — угол места, α — азимут, ПС — прямой сигнал, PC1 — рассеянный сигнал

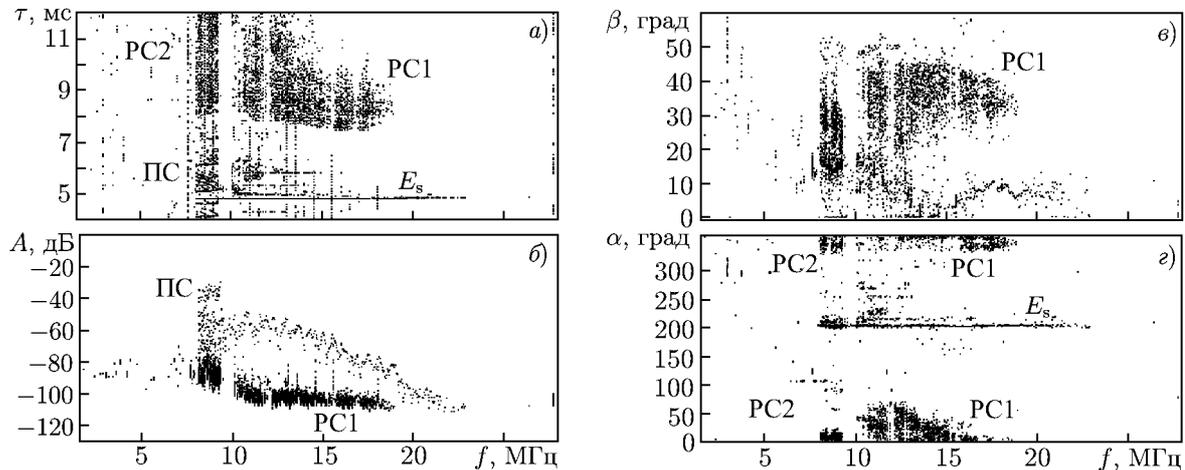


Рис. 2. То же, что и на рис. 1 для 00:19 MSK 05.01.2012. ПС — прямой сигнал, PC1, PC2 — рассеянные сигналы

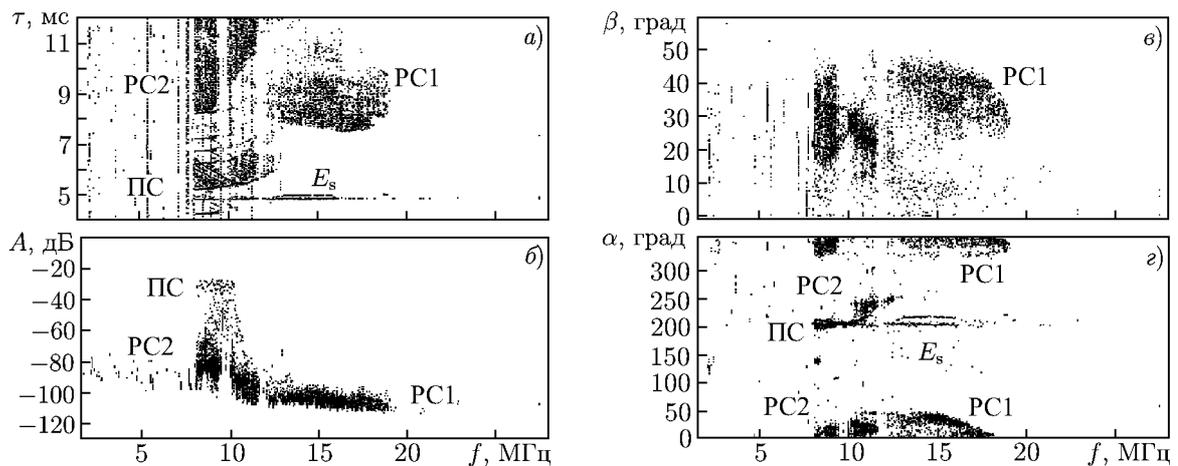


Рис. 3. То же, что и на рис. 1 для 02:09 MSK 05.01.2012. ПС — прямой сигнал, PC1, PC2 — рассеянные сигналы

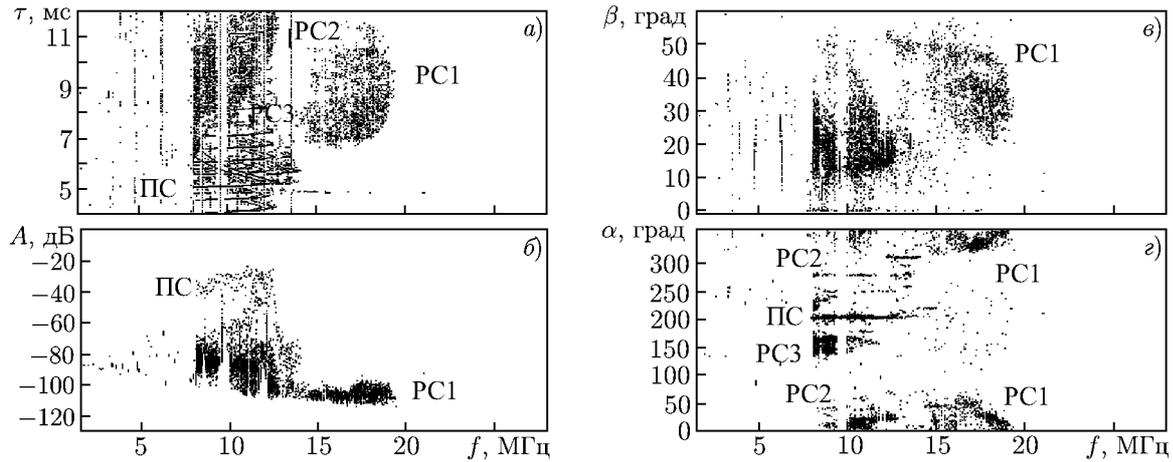


Рис. 4. То же, что и на рис. 1 для 05:04 MSK 05.01.2012. ПС — прямой сигнал, PC1–PC3 — рассеянные сигналы

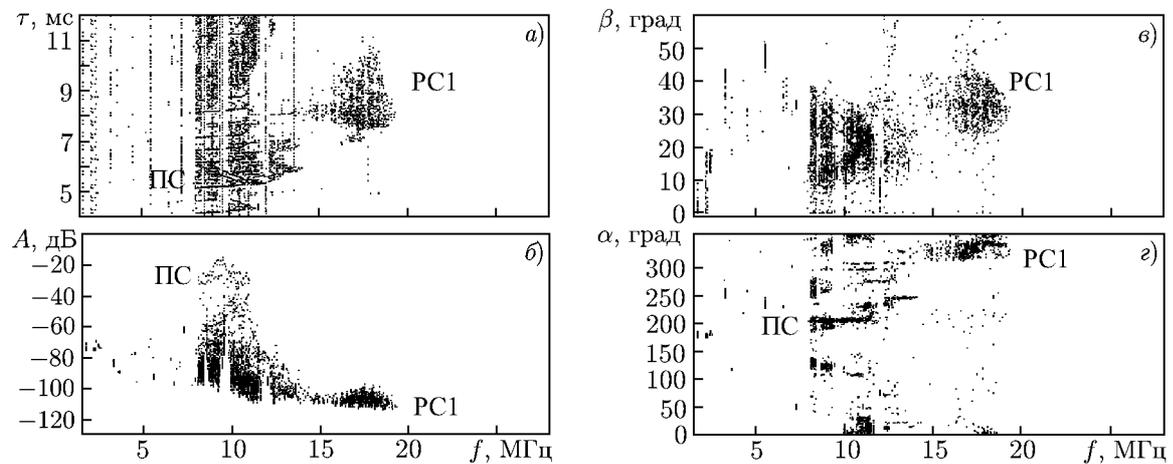


Рис. 5. То же, что и на рис. 1 для 05:59 MSK 05.01.2012. ПС — прямой сигнал, PC1 — рассеянный сигнал

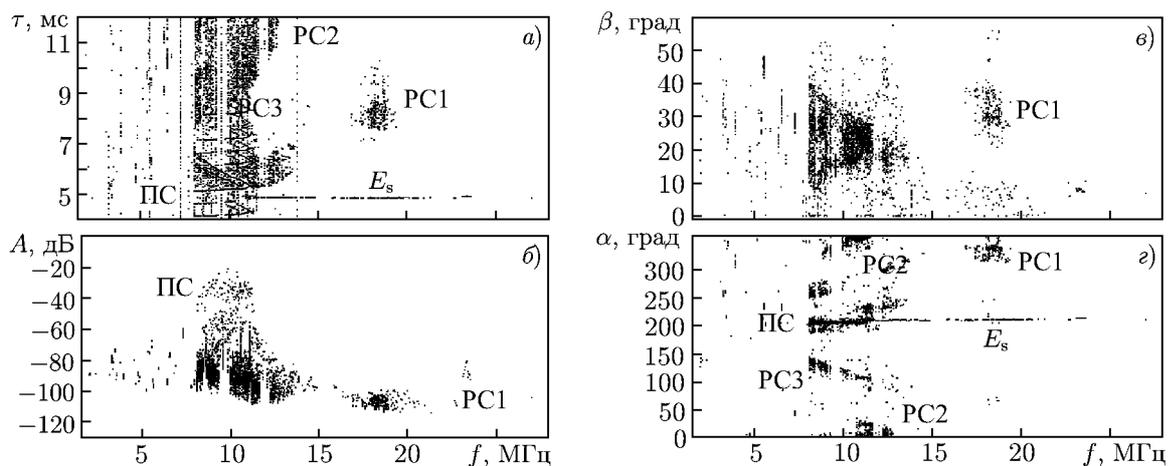


Рис. 6. То же, что и на рис. 1 для 06:09 MSK 05.01.2012. ПС — прямой сигнал, PC1–PC3 — рассеянные сигналы

и $13 \div 19$ МГц соответственно, интервал углов прихода относительно горизонта $20^\circ \div 45^\circ$, интервал азимутов прихода $-30^\circ \div 50^\circ$, амплитуда рассеянного сигнала была на $70 \div 80$ дБ меньше амплитуды прямого сигнала. Как уже говорилось, максимальная наблюдаемая частота рассеянного сигнала превышала соответствующую частоту прямого сигнала моды $1F$ на $2 \div 5$ МГц. Следует отметить, что в координатах частота—задержка—азимут рассеянный сигнал часто расслаивался на несколько треков, иногда это расслоение имело вид квазипериодических структур (см. рис. 2, 3).

Отметим, что в течение всего периода наблюдений и регистрации рассеянных сигналов (2011 год и январь 2012 года) была спокойная геомагнитная обстановка. Суммарный (суточный) магнитный индекс ΣK_p в среднем варьировался для различных дней в пределах от 3 до 28 [20].

Как видно из рис. 2, 3, 4, 6, на ионограммах наряду с сигналом РС1 регистрировались сигналы типа сигналов возвратно-наклонного зондирования, для которых характерен рост задержки с ростом частоты [21]; на рисунках сигналы отмечены надписями РС2 и РС3.

На основе моделирования распространения радиоволн с учётом результатов измерений дистанционно-частотных и угловых частотных характеристик трассы определялось положение областей, из которых выходят рассеянные сигналы РС1–РС3. Для типичного сеанса 05:04 MSK 05.01.2012 (см. рис. 4) эти результаты нанесены на физическую карту и показаны на рис. 7.

Как видно из рис. 4 и 7, механизм распространения сигнала РС3 обусловлен рассеянием радиоволн от Иранского нагорья, а сигнала РС2 — рассеянием от Среднерусской и Приволжской возвышенностей.

Зона, ответственная за рассеянный сигнал РС1, занимает протяжённую область средних широт примерно от 50° до 55° с. ш. и долгот $35^\circ \div 48^\circ$ в. д.

Отметим, что механизм появления рассеянного сигнала РС1 за счёт рассеяния радиоволн от Земли (как для сигналов РС2 и РС3) в данном случае не работает по следующим причинам. Во-первых, расстояния от приёмного пункта до этой зоны в среднем составляют $500 \div 800$ км, что в случае возвратно-наклонного зондирования и наблюдаемых частот $14 \div 19$ МГц сигнала РС1 требует значительной критической частоты ионосферы $f_{oF_2} \approx 7,5 \div 11$ МГц. В то же время, по данным станции вертикального зондирования в ИЗМИРАН (Московская обл.), попадающей в зону возмущения, в это время критическая частота f_{oF_2} составляла 2,8 МГц (см. рис. 8). Во-вторых, для трассы Кипр—Ростов-на-Дону с протяжённостью 1460 км максимальная наблюдаемая частота прямого сигнала моды $1F$ составляет 13 МГц (см. рис. 4), что заметно меньше частот $14 \div 19$ МГц аномального сигнала РС1. Это также свидетельствует не в пользу механизма формирования сигнала РС1 путём возвратно-наклонного рассеяния от Земли, тем более для расстояний меньше, чем 1460 км.

Поскольку углы прихода сигнала РС1 составляют $25^\circ \div 45^\circ$ относительно горизонта (см. рис. 1–6), то с учётом расстояния от приёмника до этой области $500 \div 800$ км можно говорить, что сигнал РС1 создаётся областью среднеширотной верхней ионосферы на высотах $250 \div 500$ км. Мы полагаем, что сигнал РС1 обусловлен рассеянием радиоволн от мелкомасштабных ионосферных

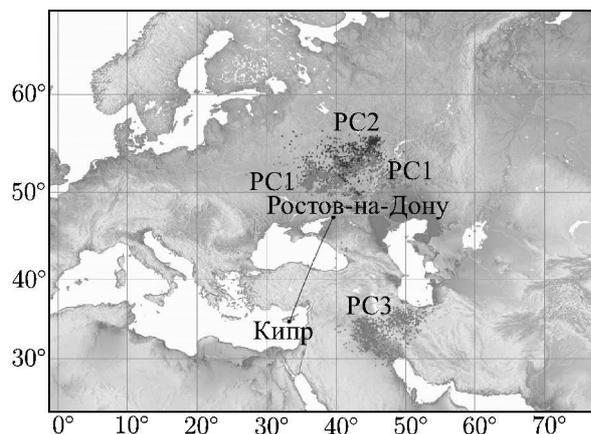


Рис. 7. Области, ответственные за сигналы РС1–РС3, для сеанса зондирования 05:04 MSK 05.01.2012

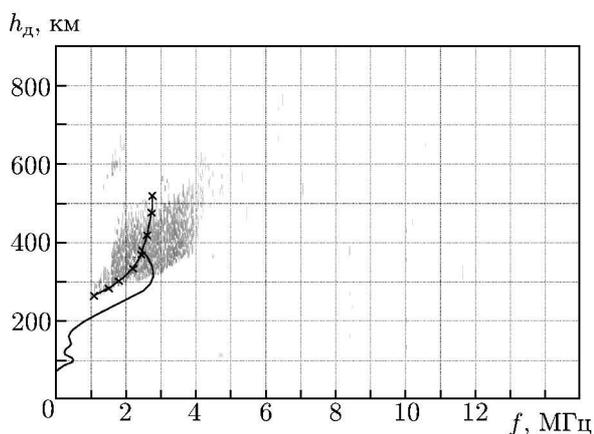


Рис. 8. Ионограмма вертикального зондирования (h_d — действующая высота) 01:00 MSK 05.01.2012 на станции ИЗМИРАН. Сплошная линия — восстановленный профиль электронной концентрации

5 978), марте (5 285), апреле (4 681) и мае (4 306) 2011 года и январе 2012 года (число сеансов 5 297). На рис. 9 показаны гистограммы числа событий появления рассеянного сигнала для января и марта 2011 года и января 2012 года (рис. 9а) и для апреля и мая 2011 года (рис. 9б). Как видно из рис. 9, в зимние месяцы наибольшая вероятность появления рассеянного сигнала имела место в ночные и ранние утренние часы, а в апреле и мае максимум вероятности появления смещён в сторону ранних утренних часов. В другие месяцы с близкими значениями общего числа сеансов наблюдений (август — 6 543, октябрь — 5 162) вероятность появления рассеянного сигнала была существенно меньше. В феврале (общее число сеансов наблюдений 3 120), июне (1 641), июле (5 585), сентябре (1 132), ноябре (3 619) и в декабре (1 920) 2011 года рассеянные сигналы не наблюдались.

Следует заметить, что часто на ионограммах наклонного зондирования явление F -рассеяния наблюдалось одновременно с регистрацией моды распространения через спорадический слой E . При этом в ряде случаев спорадический слой E регистрировался и на ионограммах вертикального зондирования на станции ИЗМИРАН, попадающей в зону интенсивного рассеяния.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ

Мы провели моделирование распространения и рассеяния радиоволн на трассе «Кипр—область рассеяния—Ростов-на-Дону», предполагая брэгговский характер рассеяния на естественных среднеширотных мелкомасштабных ориентированных вдоль магнитного поля неоднородностях с небольшой степенью вытянутости. При этом пространственное распределение ионизации задавалось моделью ионосферы IRI-2007. Значение критической частоты слоя F_2 ионосферы задавалось в модели таким образом, чтобы на прямой трассе Кипр—Ростов-на-Дону обеспечить наилучшее совпадение измеренной и модельной дистанционно-частотных характеристик основной моды распространения $1F_2$. Согласно расчётам, вся экспериментально наблюдаемая область рассеяния по географическим координатам, задержкам и углам прихода полностью перекрывается результатами моделирования, т. е. условия брэгговского рассеяния выполнены в более широкой области, чем наблюдаемая область мелкомасштабных естественных неоднородностей. Из этого следует, что на-

неоднородностях, расположенных в этой протяжённой области возмущения, простирающейся во внешнюю ионосферу выше максимума F -слоя. Это подтверждают и результаты вертикального зондирования на станции, расположенной на территории ИЗМИРАН (Московская обл.), попадающей в зону возмущённой области. Как видно из рис. 8, в это время на ионограммах вертикального зондирования наблюдалось сильное F -рассеяние.

Поперечные по отношению к магнитному полю размеры неоднородностей легко оценить из условия брэгговского рассеяния: $l_{\perp} = \lambda / [2 \sin(\theta_s/2)]$. В нашем случае для угла $\theta_s = \pi$ практически обратного рассеяния и длины волны $\lambda \approx 16 \div 21$ м получаем $l_{\perp} \approx 8 \div 10$ м.

Наиболее полные данные о F -рассеянии получены в январе (общее число сеансов наблюдений

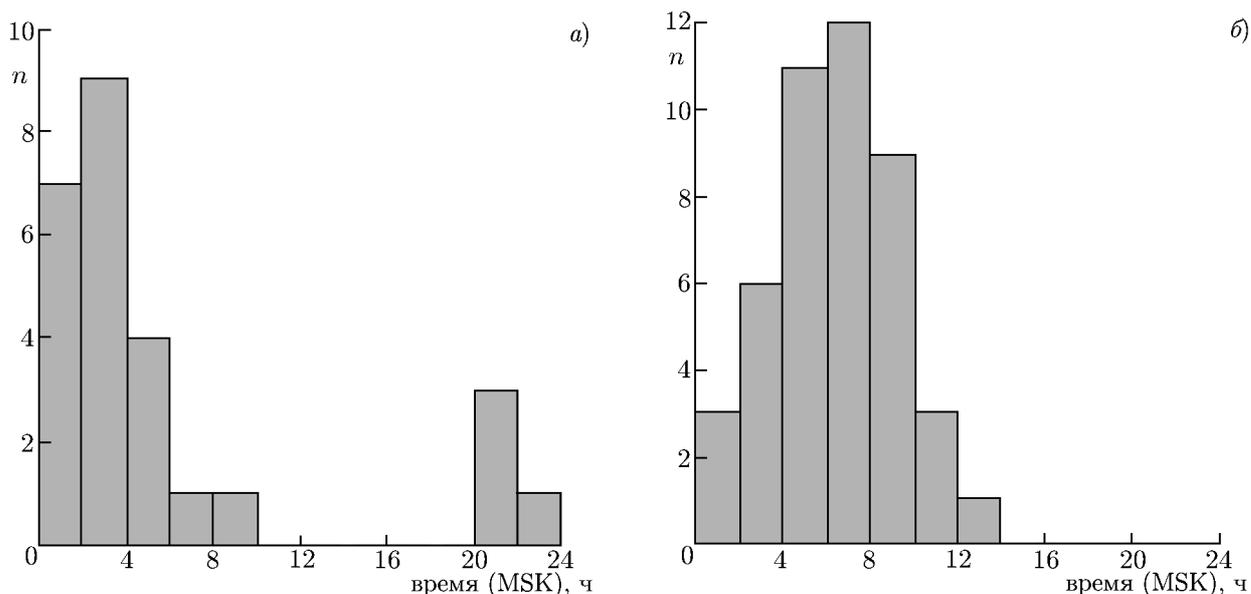


Рис. 9. Число событий n появления сигнала F -рассеяния на трассе Кипр—Ростов-на-Дону в январе и марте 2011 года и январе 2012 года (а) и апреле, мае 2011 года (б)

блюдаемая область локализации мелкомасштабных естественных неоднородностей соответствует их реальному географическому расположению, а не обусловлена «вырезанием» области рассеяния условием брэгговского отражения из общего объёма расположения неоднородностей.

Относительную амплитуду неоднородностей концентрации δN , ответственных за рассеяние, можно оценить из сравнения экспериментального и расчётного сечений рассеяния. В борновском приближении мощность рассеянного сигнала можно представить в виде [22]:

$$P_s \approx \frac{P_0 G_0 \sigma A_s \exp(-\Gamma_s)}{16\pi^2 R_1^2 R_2^2} V_{\text{эфф}}, \quad (1)$$

где P_0 — мощность передатчика, G_0 — коэффициент усиления передающей антенны, σ — удельное сечение рассеяния из единицы объёма в единичный телесный угол, A_s — эффективная площадь приёмной антенны для рассеянного сигнала, R_1 и R_2 — расстояния от передатчика и приёмника до рассеивающего объёма соответственно, Γ_s — коэффициент поглощения радиоволн на пути распространения радиоволн от передатчика и приёмника до рассеивающей области, $V_{\text{эфф}}$ — эффективный рассеивающий объём.

Величину $P_0 G_0$ можно оценить по данным измерений мощности прямого сигнала P_d на трассе распространения по дуге большого круга между передатчиком и приёмником:

$$P_d = \frac{P_0 G_0 A_d \exp(-\Gamma_d)}{4\pi R_0^2}, \quad (2)$$

где A_d — эффективная площадь приёмной антенны для прямого сигнала, R_0 — расстояние от передатчика до приёмника, Γ_d — коэффициент поглощения радиоволн на пути распространения от передатчика до приёмника.

Из (1) и (2) следует, что

$$\sigma = \frac{P_s}{P_d} \frac{A_d}{A_s} \exp(\Gamma_s - \Gamma_d) \frac{4\pi R_2^2}{V_{\text{эфф}}} \left(\frac{R_1}{R_0}\right)^2. \quad (3)$$

Таким образом, на основе измерений мощностей P_d и P_s , расчётов величин A_d , Γ_d , A_s , Γ_s и оценки эффективного объёма рассеяния $V_{эфф}$ для известных значений R_0 , R_1 и R_2 можно оценить удельное сечение рассеяния σ .

Для оценок σ мы полагаем $R_1 \approx 2100$ км, $R_2 \approx 700$ км, $R_0 \approx 1400$ км, $P_s/P_d \approx 10^{-8}$, $A_d/A_s \approx 1$, $\exp(\Gamma_s - \Gamma_d) \approx 1,2$. Размер рассеивающей области Δr в направлении вектора рассеяния $\mathbf{K} = \mathbf{k}_0 - \mathbf{k}_s$ в пределах диаграммы направленности приёмной антенны можно оценить по интервалу задержек $\Delta\tau$ рассеянного сигнала в узкой полосе частот Δf : $\Delta r = c\Delta\tau/2$. Для типичных значений $\Delta\tau \approx 3$ мс (см. рис. 2, 3) получаем $\Delta r \approx 450$ км. В вертикальной плоскости размер рассеивающей области вдоль линии, ортогональной вектору рассеяния $\mathbf{K} = \mathbf{k}_0 - \mathbf{k}_s$, для среднего угла прихода рассеянного сигнала порядка 30° относительно горизонта с учётом общей вертикальной протяжённости области рассеивающих неоднородностей составляет примерно 120 км. В горизонтальной плоскости размер рассеивающей области $\Delta x_{гор}$ можно приближённо оценить по ширине диаграммы направленности антенной решётки $\Delta\theta \approx \lambda/D$, где D — размер антенного поля. Для $\lambda \approx 18 \div 20$ м и $D = 100$ м получаем $\Delta x_{гор} \approx 130$ км. Таким образом, эффективный объём $V_{эфф} \approx 7 \cdot 10^{15}$ м³.

При таких значениях параметров из (3) получаем следующее удельное сечение рассеяния из единицы объёма в единичный телесный угол:

$$\sigma \approx 2,3 \cdot 10^{-11} \text{ м}^{-1}. \quad (4)$$

Далее учитываем, что в коротковолновом диапазоне из-за сильного влияния рефракции принимаемый ракурсно-рассеянный сигнал обрезается по частоте и основной вклад в этот сигнал дают неоднородности в узком интервале масштабов $l_\perp \approx 8 \div 10$ м. При этом для оценки интенсивности неоднородностей мы используем выражение для удельного сечения рассеяния на анизотропных неоднородностях с корреляционной функцией гауссова вида [23]:

$$\sigma = \frac{\omega_0^4}{\omega^4} \left\langle \left(\frac{\Delta N}{N} \right)^2 \right\rangle \frac{k^4 l_\perp^2 l_\parallel \sin^2 \chi}{16 \sqrt{\pi}} \exp \left[-(kl_\perp)^2 \sin^2 \frac{\theta_s}{2} \right] \exp \left[-(kl_\parallel)^2 \psi^2 \sin^2 \frac{\theta_s}{2} \right]. \quad (5)$$

Здесь ω_0 — электронная плазменная частота, ω — угловая частота, $\langle (\Delta N/N)^2 \rangle$ — средний квадрат флуктуаций электронной концентрации, l_\perp и l_\parallel — поперечный и продольный масштабы неоднородностей соответственно, χ — угол между вектором поля \mathbf{E}_0 падающей волны и волновым вектором \mathbf{k}_s рассеянной волны, $k = \omega/c$, θ_s — угол рассеяния, ψ — угол между вектором рассеяния $\mathbf{K} = \mathbf{k}_0 - \mathbf{k}_s$ и перпендикуляром к направлению вытянутости неоднородностей.

В нашем случае для практически обратного рассеяния $\theta_s \approx \pi$, угол $\chi \approx \pi/2$. Мы полагаем, что для широкого интервала углов излучения, засвечивающего обширную область с рассеивающими неоднородностями, и квазиизотропных естественных неоднородностей среднеширотной ионосферы с низкой ракурсной чувствительностью ($l_\parallel/l_\perp \geq 2 \div 4$) [24] можно считать, что с учётом рефракции выполняются условия брэгговского рассеяния, т. е. $\psi \approx 0$. Это же подтверждают результаты моделирования распространения и рассеяния радиоволн на трассе «Кипр—область рассеяния—Ростов-на-Дону».

Подставляем значения $l_\perp \approx 9$ м, $l_\parallel/l_\perp \approx 3$, $f = \omega/(2\pi) = 15$ МГц, $f_0 = \omega_0/(2\pi) \approx 2,8$ МГц в (5), получаем

$$\sigma = 3 \cdot 10^{-7} \langle (\Delta N/N)^2 \rangle \text{ м}^{-1}. \quad (6)$$

Сравнивая экспериментальное значение для удельного сечения рассеяния (4) с расчётным значением (6), получаем $(\delta N)^2 = \langle (\Delta N/N)^2 \rangle \approx 6,2 \cdot 10^{-5}$. Таким образом, относительные флуктуации электронной концентрации ионосферных неоднородностей с масштабом $l_\perp \approx 8 \div 10$ м, ответственные за явление F -рассеяния, равны $\delta N = \sqrt{\langle (\Delta N/N)^2 \rangle} \approx 7,8 \cdot 10^{-3}$, что примерно в $3 \div 5$ раз

превышает величину естественных флуктуаций электронной концентрации для обычных условий в F -области среднеширотной ионосферы [22].

3. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Интерес к исследованию явления F -рассеяния определяется рядом факторов, включая важность понимания механизмов его формирования в различных геофизических условиях и оценку влияния F -рассеяния на работу систем навигации и связи. Трудности изучения F -рассеяния обусловлены спорадическим характером его существования, поэтому для получения репрезентативных данных о его характеристиках необходимы систематические наблюдения с использованием различных методов и средств диагностики ионосферной плазмы. В связи с этим использование средств широкополосного наклонного ЛЧМ-зондирования ионосферы в качестве коротковолновых радаров, работающих на постоянной основе, позволяет на современном техническом уровне исследовать явление F -рассеяния.

В коротковолновом диапазоне радарный метод с использованием средств наклонного зондирования имеет преимущества по сравнению с вертикальным зондированием, поскольку в нём есть возможность разделения прямого и рассеянного сигналов по частоте и задержке, что позволяет отдельно исследовать характеристики рассеянного сигнала.

Результаты, полученные на трассе наклонного зондирования Кипр—Ростов-на-Дону, когда разнесённые в пространстве ЛЧМ-передатчик и приёмник (ионозонд-радиопеленгатор) использовались в качестве широкополосного бистатического коротковолнового радара, наглядно продемонстрировали перспективность такого подхода для изучения F -рассеяния в среднеширотной ионосфере. В проведённых исследованиях в условиях спокойной геомагнитной обстановки наблюдалось рассеяние радиоволн от мелкомасштабных неоднородностей, занимавших обширную область с протяжённостью примерно 1 000 и 600 км по долготе и широте соответственно в интервале высот нескольких сотен километров как ниже, так и выше максимума F -слоя.

Эксперименты с ионозондами вертикального зондирования показывают, что основные компоненты диффузных треков на ионограммах формирует наклонное отражение радиоволн от волнообразных структур типа перемещающихся ионосферных возмущений [4, 17]. Согласно данным вертикального зондирования [4], как днём, так и ночью существуют квазигоризонтальные стратификации ионосферной плазмы на уровне F -слоя: анализ данных, полученных с помощью современных ионозондов [4], показывает, что расстояние между отдельными стратами составляет 0,5 км. Стратифицированные структуры перемещаются существенно быстрее, чем фоновый слой.

Другой класс ионосферных неоднородностей — это слабые квазигоризонтальные пятна (пэтчи). Принимаемые от них сигналы на несколько десятков децибел ниже уровня других сигналов, регистрируемых на ионограммах вертикального зондирования [4]. Такие сигналы распределены более или менее случайно на ионограмме, кроме того, они находятся в области выше основного трека и могут наблюдаться на частотах выше критической частоты F -слоя. Предполагается, что эти сигналы могут быть результатом рассеяния от встроенных в стратифицированную область структур, вытянутых вдоль магнитного поля Земли. Стратификации существуют при наличии перемещающихся ионосферных возмущений и F -рассеяния. Для объяснения существования мелкомасштабных стратификаций в области средней атмосферы, подтверждённого экспериментальными данными, было выполнено много теоретических работ (см., например, [25]). В частности, много внимания было уделено разрушению атмосферных гравитационных волн на этих высотах [26, 27]. В работе [28] показано, что затравочные атмосферные гравитационные волны являются важным фактором в генерации неоднородностей среднеширотного F -слоя.

На возможную связь перемещающихся ионосферных возмущений, являющихся откликом на

атмосферные гравитационные волны, с F -рассеянием указывают и результаты наших наблюдений, когда на ионограммах наклонного зондирования регистрировались квазипериодические следы рассеянного сигнала и наблюдалось его расслоение в координатах частота—задержка—азимут. С одной стороны, перемещающиеся ионосферные возмущения могут приводить к квазипериодическим вариациям мощности и углов прихода рассеянного сигнала за счёт фокусировки и дефокусировки радиоволн [29]. С другой стороны, наличие перемещающихся ионосферных возмущений и их разрушение могут играть важную роль в генерации мелкомасштабной турбулентности и образовании F -рассеяния. Здесь следует отметить, что по данным многочисленных наблюдений состояния ионосферы и распространения радиоволн различными методами [4, 30–32] среднемасштабные перемещающиеся ионосферные возмущения с периодами от 20 до 90 мин существуют практически постоянно и при определённых условиях могут играть важную роль в генерации плазменной турбулентности.

Как уже отмечалось, в наших экспериментах F -рассеяние наблюдалось одновременно с модой распространения через спорадический слой E , который в ряде случаев регистрировался и на ионограммах вертикального зондирования станции ИЗМИРАН, попадающей в зону интенсивного рассеяния. О возможной связи появления на средних широтах F -рассеяния и спорадического слоя E говорится в работе [33]. В [33] отмечается, что F -рассеяние близко связано с пятнами спорадического слоя E из-за стимулирования гравитационными волнами крупномасштабных электрических полей, отображаемых из E в F -область.

По-видимому, для генерации плазменной турбулентности при наличии затравочных атмосферных гравитационных волн необходимо благоприятное сочетание следующих факторов: суперпозиции волновых возмущений, приводящей к образованию достаточно интенсивного возмущения с оптимальными величиной и направлением скорости, нарушения сложившегося устойчивого баланса в системе атмосфера—ионосфера—магнитосфера через взаимодействие электрических и магнитных полей на различных высотах ионосферы, изменения режима нейтральных ветров и др.

Подводя итоги, мы можем сказать, что на данный момент пока нет удовлетворительного объяснения всех особенностей механизма развития мелкомасштабной турбулентности, ответственной за явление F -рассеяния в среднеширотной ионосфере. Чтобы продвинуться в этом направлении, необходимы комплексные эксперименты с использованием различных средств и методов наблюдения, а также дальнейшее теоретическое исследование.

В заключение сформулируем основные результаты работы.

1) На трассе ЛЧМ-зондирования Кипр—Ростов-на-Дону в вечерние, ночные и ранние утренние часы зимних и весенних месяцев в условиях спокойной геомагнитной обстановки наблюдалось F -рассеяние на частотах, превышающих на $2\div 5$ МГц максимальную наблюдаемую частоту $1F$ прямого сигнала.

2) Получены следующие параметры рассеянного сигнала: задержки от $6\div 7,5$ до $8,5\div 11$ мс, частоты от $10\div 14$ до $13\div 19$ МГц, углы прихода $20^\circ\div 45^\circ$ относительно горизонта, азимуты прихода $-30^\circ\div 50^\circ$, амплитуда рассеянного сигнала была на $70\div 80$ дБ меньше амплитуды прямого сигнала.

3) В ряде случаев рассеянный сигнал расслаивался в координатах частота—задержка—азимут на несколько треков, иногда это расслоение имело вид квазипериодических структур.

4) На основе моделирования и сопоставления с экспериментальными данными установлено, что наблюдаемый аномальный сигнал обусловлен обратным рассеянием радиоволн на мелкомасштабных неоднородностях ионосферной плазмы с размерами $8\div 10$ м, занимающих протяжённую область среднеширотной ионосферы ($50^\circ\div 55^\circ$ с. ш., $35^\circ\div 48^\circ$ в. д.) на высотах как ниже, так и выше максимума F -слоя ($h \approx 250\div 450$ км).

5) Относительные флуктуации электронной концентрации рассеивающих неоднородностей составляют величину $\delta N \approx 7,8 \cdot 10^{-3}$, что примерно в 3–5 раз превышает значение δN естественных флуктуаций электронной концентрации для обычных условий в F -области среднеширотной ионосферы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 12–02–00177а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kelley M. C., McClure J. P. // J. Atm. Terr. Phys. 1981. V. 43, No. 5–6. P. 427.
2. Ossakow S. L. // J. Atm. Terr. Phys. 1981. V. 43. P. 437.
3. Гершман Б. Н., Казимировский Э. С., Кокоуров В. Д., Чернобровкина Н. А. Явление F -рассеяния в ионосфере. М.: Наука, 1984. 141 с.
4. Bowman G. G. // J. Geomag. Geoelectr. 1990. V. 42. P. 109.
5. Booker H. G., Wells H. W. // J. Geophys. Res. 1938. V. 43. P. 249.
6. Pierce J. A., Mimno H. R. // Phys. Rev. 1940. V. 57, No. 1. P. 95.
7. Munro G. H. // Nature. 1948. V. 162, No. 11. P. 886.
8. Bowman G. G., Monro P. E. // J. Atm. Terr. Phys. 1988. V. 50. P. 215.
9. Tsunoda R. T., Barons M. J., Owen J., Towle D. M. // Radio Sci. 1979. V. 14. P. 1 111.
10. Farley D. T., Balsley B. B., Woodman R. F., McClure J. P. // J. Geophys. Res. 1970. V. 75. P. 7 199.
11. Woodman R. F., La Hoz C. // J. Geophys. Res. 1976. V. 81. P. 5 447.
12. Fukao S., Ozawa Y., Yokaoyama M., et al. // J. Geophys. Res. 2004. V. 109. Art. no. A02304.
13. Reinisch B. W., Abdu M., Batista I., et al. // Ann. Geophys. 2004. V. 22. P. 3 145.
14. Hysell D. L., Larsen M. F., Swenson C. M., et al. // Ann. Geophys. 2006. V. 24. P. 1 387.
15. Tiwari D., Engavale B., Bhattacharyya, et al. // Ann. Geophys. 2006. V. 24. P. 2 416.
16. Rodrigues F. S., Hysell D. L., De Pauka E. R. // Ann. Geophys. 2008. V. 26. P. 3 355.
17. Bowman G. G. // Indian J. Radio Space Phys. 1996. V. 25. P. 93.
18. Вертоградов Г. Г., Урядов В. П., Вертоградов В. Г., Шевченко В. Н. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2007. Т. 12, № 5. С. 25.
19. Патент № 2399062 РФ. Ионосферный зонд-радиопеленгатор / Г. Г. Вертоградов, В. П. Урядов, В. Г. Вертоградов, С. В. Кубатко. Оpubл. 10.09.2010.
20. <http://www.sec.noaa.gov>.
21. Чернов Ю. А. Возвратно-наклонное зондирование ионосферы. М.: Связь, 1971. 204 с.
22. Гершман Б. Н., Ерухимов Л. М., Яшин Ю. Я. Волновые явления в ионосфере и космической плазме. М.: Наука, 1984. 392 с.
23. Яковлев О. И., Якубов В. П., Урядов В. П., Павельев А. Г. Распространение радиоволн. М.: Ленанд, 2009. 496 с.
24. Насыров А. М. Рассеяние радиоволн анизотропными ионосферными неоднородностями. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1991. 150 с.
25. Hines C. O. // J. Atm. Sci. 1988. V. 45. P. 1 269.
26. Friits D. C. // Rev. Geophys. Space Phys. 1984. V. 22. P. 275.
27. Friits D. C. // J. Atm. Sci. 1985. V. 42. P. 2 043.
28. Huang C.-S., Miller C. A., Kelley M. C. // Radio Sci. 1994. V. 29. P. 395.
29. MacDougall J. W., Andre D. A., Sofko G. J., et al. // Ann. Geophys. 2000. V. 18. P. 1 550.
30. Афраймович Э. Л., Перевалова Н. П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.

31. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. // Доклады XXI Всерос. научной конф. по распространению радиоволн, Йошкар-Ола, 25–27 мая 2005 года. Т. 1. С. 152.
32. Вертоградов Г. Г., Вертоградов В. Г., Урядов В. П. // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49, № 12. С. 1015.
33. Haldoupis C., Kelley M. C., Hussey G. C., Shalimov S. // J. Geophys. Res. A. 2003. V. 108. P. 1446.

Поступила в редакцию 16 января 2013 г.; принята в печать 21 февраля 2013 г.

SPREAD- F RADAR OBSERVATIONS IN THE MIDLATITUDE IONOSPHERE USING AN IONOSONDE-RADIODIRECTION FINDER

V. P. Uryadov, G. G. Vertogradov, and E. G. Vertogradova

We present the results of experimental studies of the spread- F phenomenon in the midlatitude ionosphere, which were obtained using a broadband chirp HF radar of bistatic configuration on the Cyprus—Rostov-on-Don oblique sounding path. In the evening, night, and early morning hours of the winter and spring months, in a quiet geomagnetic environment, scattered signals were detected at frequencies exceeding the maximum observable frequency (MOF) of the direct-signal $1F$ mode with the following parameters: delays of 6–7.5 to 8.5–11 ms, frequencies of 10–14 to 13–19 MHz, vertical angles of arrival 20° – 45° , azimuthal angles of arrival -30° – 50° , and amplitude of scattered signal by 70–80 dB less than the direct-signal amplitude. Based on modeling of HF propagation and scattering and on comparison with the experimental data, it is established that the observable abnormal signal is due to the backscattering of radio waves by small-scale irregularities with sizes about 8–10 m, which occupy an extended area of the midlatitude ionosphere (50° – 55° N, 35° – 48° E) at altitudes both below and above the the F -layer maximum (250–450 km). Relative fluctuations of the electron number density of the scattering irregularities are estimated as $\delta N \approx 7.8 \cdot 10^{-3}$, which is about a factor of 3 to 5 greater than δN for natural fluctuations of the electron number density under typical conditions in the midlatitude ionospheric F region. Possible relation between spread F and the traveling ionospheric disturbances is discussed.