

неровной поверхности S к размеру пятна подсвета от источника в однородной среде в плоскости, перпендикулярной оптической оси пучка).

Расчеты проводились по формуле (3) при следующих значениях параметров.

$$\lambda = 1,06 \text{ мкм}; L_{\text{и}} = 5 \cdot 10^3 \text{ м}; 2\Delta\alpha_{\text{и}} = \frac{4\varepsilon^{1/2}(C_{\text{e}}=0)}{k} = 1,1'; \psi = 90^\circ \text{ (кривые 1, 2); } \psi = 60^\circ$$

$$(3, 4); \psi = 30^\circ \text{ (5, 6); } C_{\text{и}} \gg C_{\text{e}}; \chi = 90^\circ.$$

Из рисунка видно, что случайно-неровный характер локируемой поверхности может привести к существенному увеличению размера изображения (как для однородной среды, так и для среды с сильными флуктуациями диэлектрической проницаемости) и повлиять тем самым на работу оптико-электронного прибора в локационной схеме [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Белов М. Л., Орлов В. М. — Изв вузов — Радиофизика, 1979, 22, № 3, с. 290.
2. Орлов В. М., Самохвалов И. В., Матвиенко Г. Г. и др. Элементы теории светорассеяния и оптическая локация. — Новосибирск: Наука, 1982. — 225 с.
3. Басс Ф. Г., Фукс И. М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. — М.: Наука, 1972. — 424 с.

Всесоюзный научно-исследовательский
институт морского рыбного хозяйства
и океанографии

Поступила в редакцию
10 февраля 1987 г.

УДК 551.510.535

ИОНОГРАММЫ С МНОГОЛУЧЕВОСТЬЮ И НЕОДНОРОДНАЯ СТРУКТУРА ИОНОСФЕРЫ

И. И. Варшавский, А. Д. Калихман

Ионограммы с неоднозначной зависимостью группового пути от частоты или ионограммы с многолучевостью отмечаются в присутствии ионосферных возмущений естественного и искусственного происхождения. Такие ионограммы включают особенности типа серпов, дополнительные следы с частотами ниже критической частоты слоя $F2$ и не связанные с положением высокочастотного следа. Получение информации о структуре и динамике области возмущения из ионограмм с многолучевостью затруднено.

В настоящей работе для анализа неоднородной структуры ионосферы по ионограммам с многолучевостью предлагается проведение траекторных расчетов при заданной модели неоднородной среды и синтезирование ионограмм по возвратным траекториям [1-3]. Такой подход обладает большой наглядностью, поскольку траектории отраженных лучей разделяются на семейства, каждому из которых отвечает свой след на ионограмме. Форма, размеры, локализация и амплитуды неоднородностей подбираются таким образом, чтобы получаемые на ионограммах следы были подобны реально наблюдаемым. При этом остается открытым вопрос обоснования однозначности выбора структуры неоднородности, хотя, например, в условиях активных экспериментов, когда известны основные параметры искусственной области возмущения, задача оказывается достаточно определенной [3].

Моделирование ионограмм или метод траекторного синтеза основан на расчете возвратных траекторий, соответствующих диаграммам направленности антенн обычных наземных ионозондов. Распределение электронной концентрации $N(r)$ задается в виде суммы зависящего от высоты фонового профиля $N_0(z)$ и возмущения $\delta N(r)$. Фоновый профиль с учетом принятой декартовой системы координат с началом на земной поверхности, направленной вертикально вверх осью z , на восток осью x и на север осью y , задается выражением

$$N_0(z) = N_m \exp \left\{ - \left(\frac{z - H_m}{Y_m} \right)^2 - p \left[1 - \exp \left(- \left(\frac{z - H_m}{Y_m} \right)^2 \right) \right] \right\}$$

со следующими значениями параметров: концентрация в максимуме слоя $N_m = 10^6 \text{ см}^{-3}$, высота максимума $H_m = 300 \text{ км}$, полутолщина слоя $Y_m = 100 \text{ км}$, крутизна слоя $p = 1$ или 5, что условно отражает форму ночного или дневного профиля ионосферы, магнитное наклонение равно 70° , электронная гирочастота $1,4 \text{ МГц}$. Возмущение задается в виде функции только двух координат $\delta N(z, x)$ или $\delta N(z, y)$:

$$\delta N(z, y) = N_0(z) \sum_i \delta_i \exp \left[- \left(\frac{y - Y_i}{\Lambda_{iy}} \right)^2 - \left(\frac{z - Z_i}{\Lambda_{iz}} \right)^2 \right],$$

где i — число возмущений. Для синтеза ионограмм находятся траектории всех лучей на каждой из частот зондирования, которые попадают после отражения от ионосфера в точку излучения [4].

Возникновение многолучевости определяется структурой неоднородности в области отражения. Анализ критерия возникновения многолучевости [4] показывает, что порог ее появления снижается с приближением частоты зондирования к критической, порог ниже для обычной волны, чем для необычной, и ниже для слоя с малой крутизной, чем для слоя с большой крутизной.

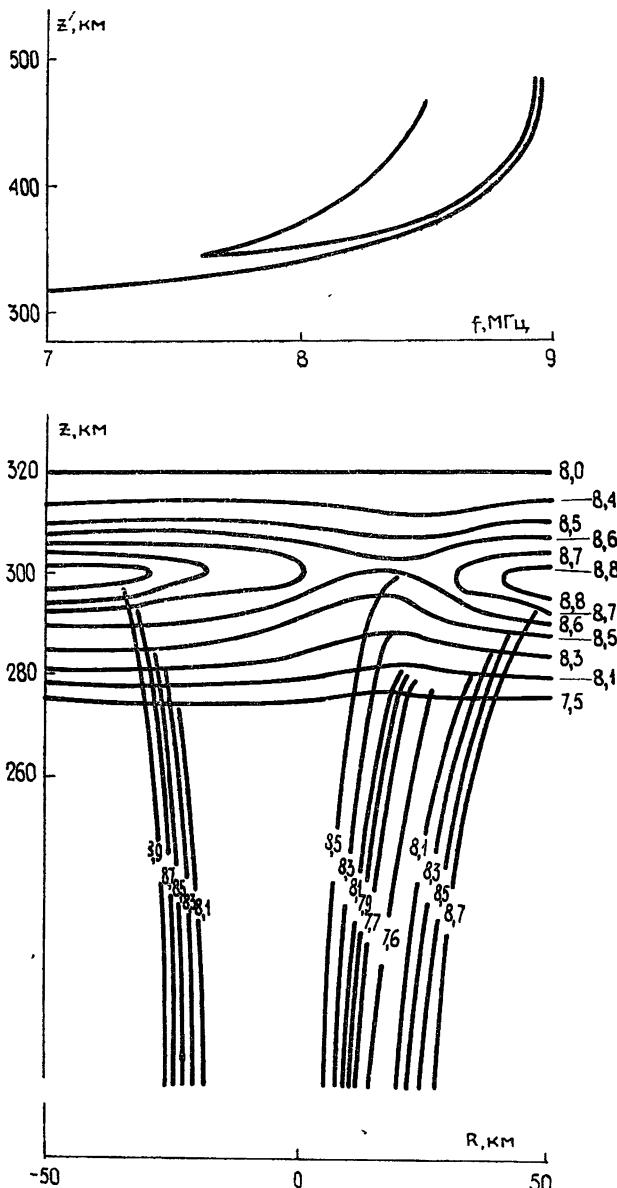
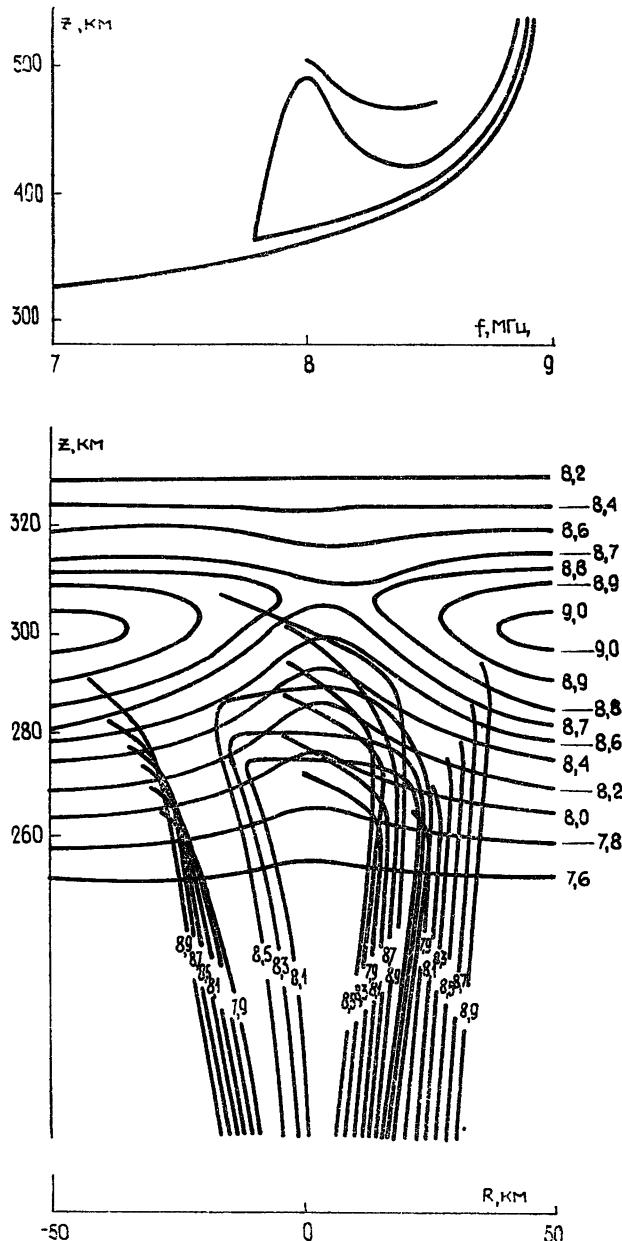


Рис. 1.

На рис. 1 приведен наиболее простой случай возникновения многолучевости. (Здесь z' — групповой путь, R — расстояние от пункта зондирования.) Ниже синтезированной ионограммы показаны проекции траекторий возвратных лучей на плоскость (z, y) и линии равной ионизации при задании неоднородности в виде области с локальным понижением концентрации ($i=1$, $\delta_1 = -0,15$, $\Lambda_{1x} = 30$ км, $\Lambda_{1z} = 20$ км, $p=5$), центр которой расположен ниже максимума слоя ($Z_1 = 290$ км) и свинут относительно вертикали ($Y_1 = 15$ км). Ионограмма и траектории на рис. 1 только для обычной волны, а для необычной волны картина подобная. До порога 7,6 МГц отмечается один основной след, формируемый отклоняющимся к западу траекториями, а выше возникают дополнительные следы. Второй расщепленный след вместе с первым образует особенность типа цветка, нередко наблюдаемую в экспери-

ментах по воздействию на ионосферу мощным радиоизлучением. Подобная особенность на ионограмме в естественных условиях, приведенных в работе [5], и данные одновременных измерений углов прихода показывают, что многолучевость возникает при близких к вертикальным углах прихода, как и на рис. 1.



граммах с многолучностью и обнаруживаются на ионограммах при диагностике локальных понижений ионизации в F-области, например, при пролете ракеты Авангард [6].

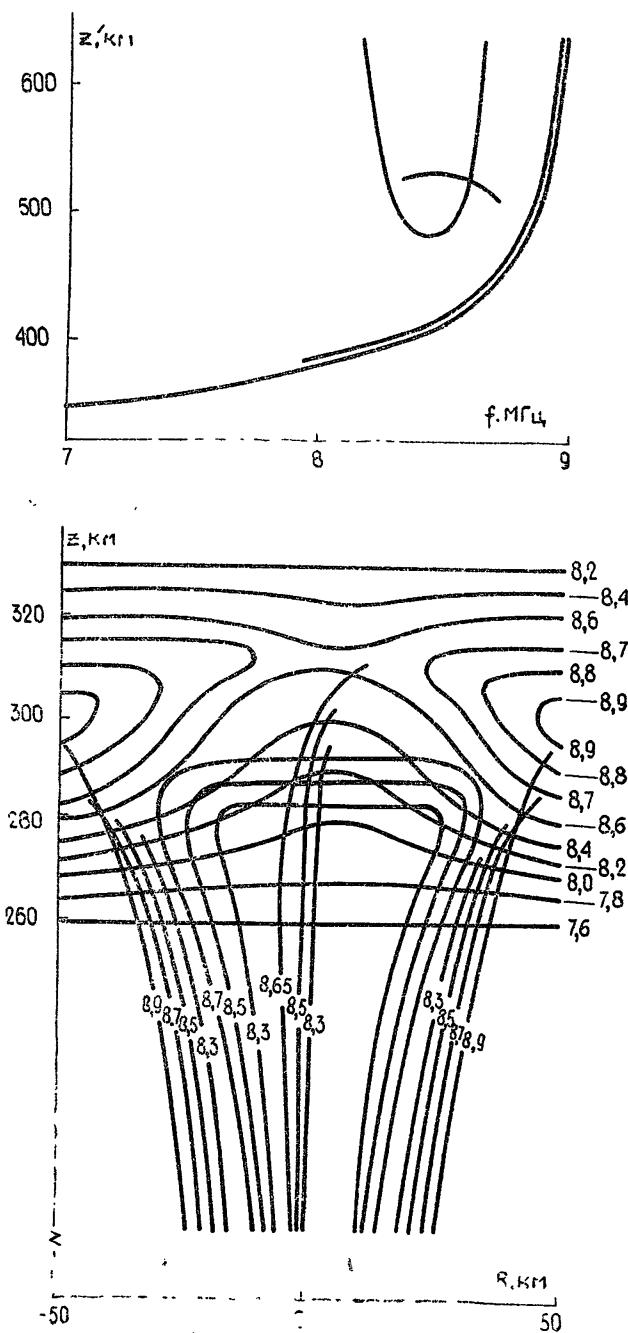


Рис. 3.

Синтезированная ионограмма с дополнительными следами, не достигающими критической частоты, и проекции траекторий на плоскость (z , x) приведены на рис. 3 для неоднородности с параметрами $i=1$, $\delta_1 = -0,15$, $\Lambda_{1x} = 30$ км, $\Lambda_{1z} = 20$ км, $p=1$, $Z_1 = 290$ км, $X_1 = 2$ км. Видно, что эта ионограмма с многолучевостью образуется тремя упомянутыми выше семействами траекторий. Серпообразная особенность не сопровождается начальным следом с ростом действующей высоты и не приближается к критической частоте основного следа. И в этом случае очень четко проявляется пороговый характер дополнительных следов.

В рамках рассматриваемой структуры неоднородности можно синтезировать ионограмму с максимальной частотой серпообразной особенности, превышающей кри-

тическую частоту, если над областью с пониженной ионизацией расположить неоднородность с концентрацией выше фоновой ($\delta_2 > 0$). На рис. 4 приведены результаты расчетов для неоднородностей с параметрами $\delta_1 = -0,15$, $\delta_2 = 0,1$, $i = 2$, $\Lambda_{1y} = \Lambda_{2y} = 30$ км, $\Lambda_{1z} = \Lambda_{2z} = 20$ км, $p = 1$, $Z_1 = 290$ км, $Z_2 = 310$ км, $Y_1 = Y_2 = 2$ км. Наличие выше максимума слоя неоднородности с концентрацией выше фоновой приводит к появлению дополнительного следа с максимальной частотой, превышающей критическую частоту основных следов.

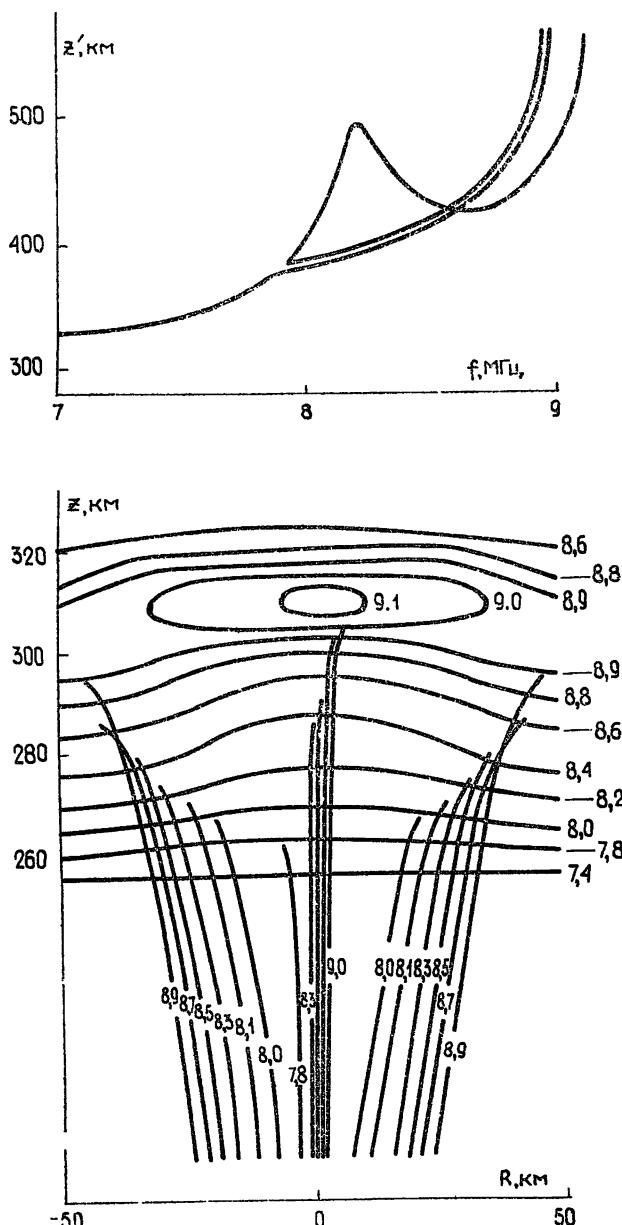


Рис. 4.

Рассмотренные варианты синтезированных ионограмм практически охватывают все ситуации, наблюдаемые на реальных ионограммах с многолучевостью. Они естественным образом дополняют хорошо изученные ионограммы с серпами при однозначной зависимости группового пути от частоты, когда восстановление плоскослоистого распределения ионизации не вызывает затруднений. При моделировании ионограмм с многолучевостью принципиальным является выбор неоднородности с электронной концентрацией ниже фоновой. Следует отметить, что отражения от неоднородностей с радиусом кривизны, меньшим высоты их расположения, могут быть сильно дефокусированы и не различимы на ионограммах.

При расположении возмущения над пунктом зондирования отклоняющиеся к востоку и западу траектории рефрагируют таким образом, что основной след на ионограммах

грамм как бы «не замечает» присутствия возмущения даже достаточно сильного и ведет себя очень устойчиво. Таким образом, основной след на многолучевой ионограмме в большинстве случаев позволяет приблизенно восстановить фоновое распределение ионизации, а дополнительные следы позволяют делать качественные и количественные заключения о неоднородностях в области отражения.

Поведение дополнительных следов на многолучевых ионограммах определяется трехмерным распределением ионизации, а переходы от одного семейства траекторий к другому, как показывают расчеты, происходят, в основном, при малых угловых девиациях. В условиях активных экспериментов, когда необходимо восстановление пространственной структуры и эволюции возмущения, метод траекторного синтеза ионограмм может оказаться более чувствительным и эффективным средством диагностики в сравнении с другими методами, например регистрацией доплеровского смещения частоты и углов прихода радиосигнала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Варшавский И. И., Каляхман А. Д. В кн.: Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. — М.: Наука, 1984, вып. 67, с. 165.
2. Paul A. K., Smith G. H., Wright J. W. — Radio Sci., 1968, 3, № 1, р. 15.
3. Данилкин Н. П., Лукин Д. С., Стасевич В. Н. — Геомагнетизм и аэрономия, 1987, 27, с. 217.
4. Варшавский И. И., Каляхман А. Д. В кн.: Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. — М.: Наука, 1987, вып. 80, с. 92.
5. Paul A. K. — Radio Sci., 1985, 20, № 4, р. 959.
6. Booker H. G. — J. Geophys. Res., 1961, 66, № 4, р. 1073.

Сибирский институт земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн
СО АН СССР

Поступила в редакцию
2 марта 1987 г.

УДК 550.510.535

РЕАКЦИЯ ОБЛАСТИ F ИОНОСФЕРЫ НА ПОВТОРНЫЕ ТОЛЧКИ В АПРЕЛЕ 1984 г. ПОСЛЕ ГАЗЛИЙСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

М. Н. Фаткуллин, Т. В. Гайворонская, Т. И. Зеленова, С. С. Хусамиддинов

В районе г. Газли 19 марта 1984 г., как известно, имело место сильное землетрясение, а после наблюдались повторные толчки (афтершоки) [1]. Во время и после ряда подземных толчков, имевших место в апреле 1984 г. в п. Цветущем, практически в эпицентральной области, ИЗМИР АН СССР и ИС АН УзбССР велись наземное ВЧ зондирование ионосферы при помощи станции МИС-5. Эти измерения проводились специально с целью изучения влияния землетрясений на ионосферу.

В данной работе кратко рассматриваются эффекты в области F , наблюдавшиеся после повторных толчков 21, 22, 23, 25 и 26 апреля 1984 г., и особое внимание уделяется волнообразным флюктуациям параметров ионосферы. Происхождение таких эффектов в ионосфере принято связывать с длиннопериодными акустическими волнами (инфразвук), генерируемыми при землетрясениях на границе Земля — воздух за счет гравитационных волн и распространяющимися в атмосфере почти вертикально.

После фиксации подземного толчка станция автоматически переключалась на режим минутных измерений. С ионограмм снимались критическая частота (f_0F2), действующая высота (h_m') слоя $F2$ и действующие высоты (h_f') на фиксированных частотах $f=4,0 \div 8,0$ МГц. Было рассмотрено шесть повторных подземных толчков, все они имели место в дневное время ($\sim 09 \div 19$ ч LT) и относятся к литосферным (кбровым). Для этих шести толчков координаты эпицентра — $\Phi=40,3 \div 40,5^\circ N$, $\lambda=63,4 \div 63,6^\circ E$, энергетический класс $9,6 \leq K \leq 12,1$, магнитуда $3,1 \leq M \leq 4,5$, размер очага $0,45 \leq l \leq 2,4$ км и интенсивность $2 \leq J \leq 6$ (см. подробней [2]).

На рис. 1 приведены примеры вариаций различных параметров области F после землетрясения 22 апреля 1984 г. ($K=12,1$, $M=4,5$, $l=2,4$ км, $J=6$), которое является наиболее интенсивным среди шести рассмотренных. У кривых h_f' указаны значения частоты (в МГц). Вертикальной стрелкой указан момент соответствующего землетрясения.

Каждое из рассмотренных землетрясений имеет свои особенности, тем не менее всем им присущи и некоторые общие черты, проявляющиеся в поведении ионосферных параметров. Наиболее характерными особенностями для рассматриваемых здесь землетрясений являются следующие.