

УДК 550.338.2

## ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ СЛЕДЫ ЗЕМНЫХ ОТРАЖЕНИЙ НА ИОНОГРАММАХ ИСЗ “ИНТЕРКОСМОС-19” В ОБЛАСТИ НОЧНОГО ПРОВАЛА

© 2020 г. А. Т. Карпачев<sup>1</sup>, \*, Г. А. Жбанков<sup>2</sup>, \*\*

<sup>1</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт физики Южного федерального университета  
(НИИ физики ЮФУ), г. Ростов-на-Дону, Россия

\*e-mail: karp@izmiran.ru

\*\*e-mail: zhbankov@ip.rsu.ru

Поступила в редакцию 03.04.2019 г.

После доработки 17.07.2019 г.

Принята к публикации 26.09.2019 г.

Исследована серия высокоширотных ионограмм внешнего зондирования на ИСЗ “Интеркосмос-19”, на которых наблюдались дополнительные горизонтальные следы земных отражений. Ионограммы были зарегистрированы 11 мая 1979 г. в ночной (00–01 LT) слабо-возмущенной ( $Kp = 3+$ ) ионосфере южного полушария в области главного ионосферного провала. Провал имел плоское днище, а также крутую и высокую полярную стенку, сформированную высыпаниями частиц на экваториальной кромке аврорального овала. Дополнительный земной след удалялся от основного со 100 до 800 км при движении спутника от полярной стенки к средним широтам. Траекторные расчеты показали, что дополнительные земные следы формируются многократными отражениями от полярной стенки и земной поверхности. При этом удалось добиться практически полного соответствия модельной ионограммы с экспериментальной.

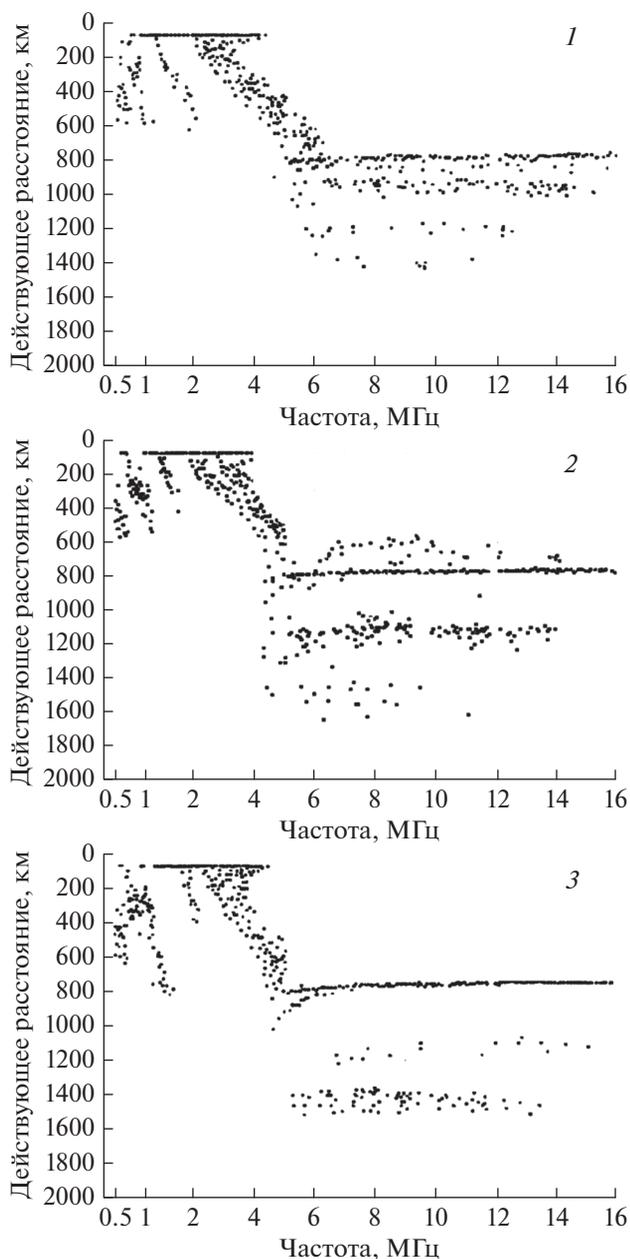
DOI: 10.31857/S001679402001006X

### 1. ВВЕДЕНИЕ

На ионограммах ИСЗ “Интеркосмос-19” (ИК-19) довольно часто наблюдались необычные следы распространения как главных компонент радиосигнала, отраженного от ионосферы, так и отраженного от земной поверхности сигнала. Как правило, необычные следы связаны с отражениями от неоднородностей ионосферы. Иначе говоря, они интересны не сами по себе, а как индикаторы неоднородностей ионосферной плазмы, образующихся в разных условиях и на разных широтах. В данной статье речь пойдет о необычных земных отражениях. Ранее уже рассматривались необычные земные отражения, действующее расстояние которых быстро увеличивалось с частотой, так что они выглядели, как сильно наклонные [Данилкин и др., 2006; Карпачев и др., 2013]. Ниже будут рассмотрены дополнительные земные отражения, горизонтальные, как и основной земной след, но сильно удаленные, вплоть до 1400–1600 км в терминах действующего расстояния.

### 2. ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ

На рисунке 1 приведены три примера из редкой серии ионограмм, на которых наблюдался дополнительный земной след, степень удаленности которого от нормального следа увеличивалась по мере движения спутника от высоких широт к более низким. Ионограммы были зарегистрированы 11 мая 1979 г. в ночной (00–01 LT) слабо-возмущенной ( $Kp = 3+$ ) ионосфере южного полушария. Серия состояла из 13 ионограмм, и, как видно из рис. 1, расстояние между основным и дополнительным земным следом увеличивалось от ~100 км до ~800 км при движении от широты  $\sim 72^\circ\text{--}73^\circ\text{ S}$  до широты  $66^\circ\text{ S}$ , что составляет ~700 км. Это значение примерно соответствует увеличению расстояния между основным и дополнительным следом. Поэтому можно предположить, что дополнительные отражения имели место от некоторой структуры, расположенной на широте  $73^\circ\text{--}74^\circ\text{ S}$ , что соответствует, примерно, геомагнитной широте  $-60^\circ$  и геомагнитному наклону  $-70^\circ$ .



**Рис. 1.** Ионограммы, зарегистрированные 11 мая 1979 г. в ночной ионосфере (00–01 LT) в долготном секторе  $257^{\circ}$ – $285^{\circ}$  E на высоте 780 км на широтах (сверху вниз)  $70.9^{\circ}$  S,  $69.2^{\circ}$  S и  $66.6^{\circ}$  S.

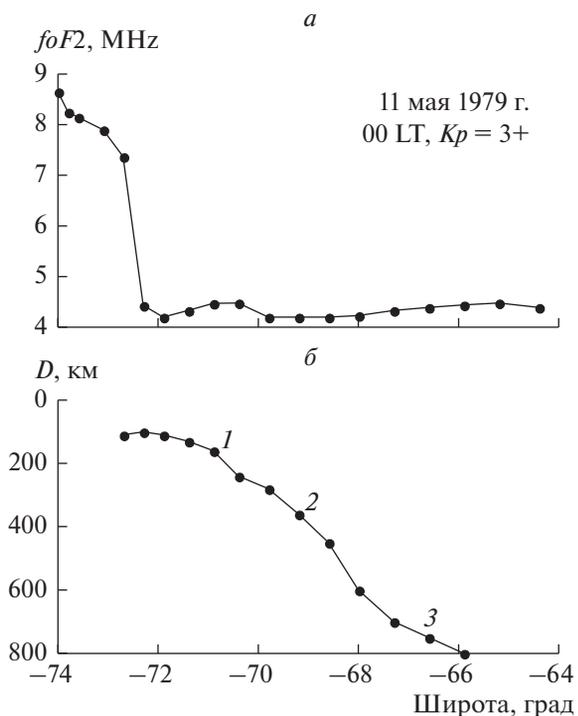
### 3. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА 11 МАЯ 1979 г.

На рисунке 2 показаны изменения с широтой величины  $foF2$  и расстояния от стенки повышенной концентрации при движении вдоль орбиты спутника. Поскольку наблюдения были сделаны в полночь, они относятся к области главного ионосферного провала (ГИП). Экваториальная стенка ГИП пологая, она фактически представляет плато. Неглубокий минимум  $foF2$  наблюдается на широте  $-72^{\circ}$ , что соответствует геомаг-

нитной широте  $-58^{\circ}$ . Для 00 LT,  $Kp = 3+$  и долготы  $264^{\circ}$  E – это обычное положение минимума ГИП. Полярная стенка провала чрезвычайно крутая. Геомагнитная широта  $-60^{\circ}$  в околополуночных условиях при  $Kp = 3+$  соответствует экваториальной кромке аврорального овала, где происходят высыпания частиц, создающих неоднородности ионосферной плазмы. Эти неоднородности вытянуты вдоль магнитных силовых линий. Стенка повышенной концентрации в авроральной ионосфере ориентирована по долготе, поскольку высыпания частиц обычно развиваются вдоль долготы. При движении спутника по орбите отражения идут перпендикулярно к стенке повышенной концентрации, поэтому изменения долготы при оценках можно не учитывать. Таким образом, мы имеем дело с довольно необычной структурой, несвойственной спокойным условиям в южном полушарии. Это, вероятно, связано с тем, что момент наблюдений соответствует началу суббури с  $AE = 600$  нТл. С другой стороны, образование подобной стенки в высокоширотной ионосфере не является редким явлением, оно было, например, зарегистрировано и описано ранее по данным спутника Космос-1809 [Данилкин и др., 1991]. Дополнительный земной след размывался по мере удаления от стенки повышенной концентрации. Действующее расстояние до отраженных следов слабо изменялось с ростом частоты зондирования в отличие от сильно наклонных следов, рассмотренных ранее. Поэтому будем обозначать их как горизонтальные.

### 4. ТРАЕКТОРНЫЕ РАСЧЕТЫ

Интерпретация эксперимента проводилась на основе траекторных расчетов. Методика этих расчетов подробно описана в работах [Кравцов и Орлов, 1980; Жбанков и др., 2010; Карпачев и др., 2012], поэтому напомним только основные ее положения. Расчеты проводятся в три этапа: 1) создание модели фоновой ионосферы на основе данных ИК-19; 2) задание неоднородной структуры ионосферы; 3) собственно траекторные расчеты методом характеристик на основе созданной модели ионосферы и формирование модельной ионограммы. Ясно, что главная проблема связана с построением модели неоднородной ионосферы для каждого конкретного случая. Она строится методом последовательных приближений так, чтобы полученная модельная ионограмма максимально соответствовала экспериментальной. Траекторные расчеты проводятся в двумерном приближении, лучи лежат в плоскости магнитного меридиана (проходящей через спутник). Задачей расчетов является воспроизведение основных следов, обусловленных регулярной ионосферой и дополнительных следов, создаваемых “главной” неоднородностью.

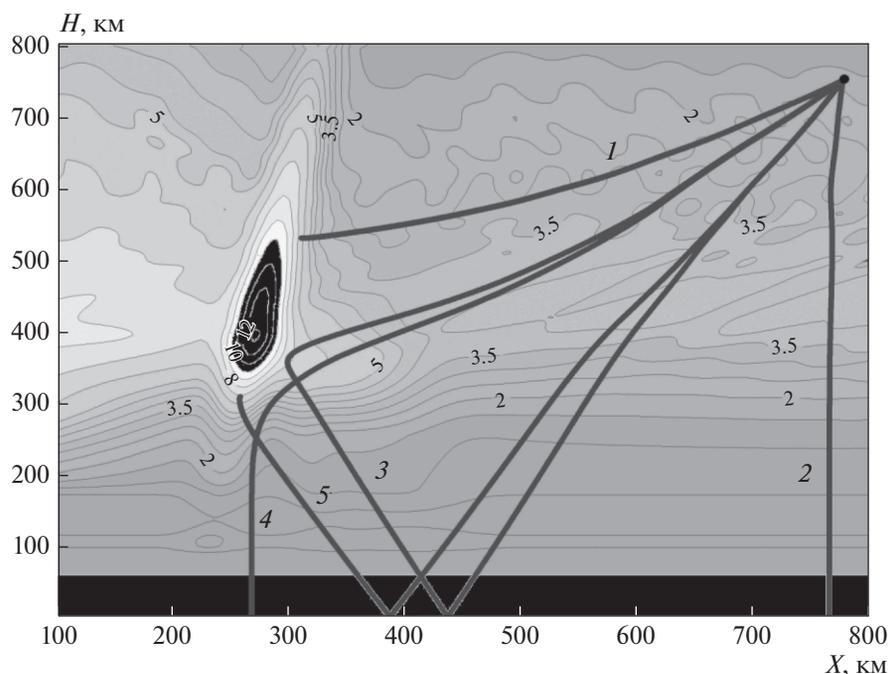


**Рис. 2.** Изменения с широтой величины  $foF2$  и расстояния  $D$  удаленного следа от основного земного следа вдоль орбиты спутника для наблюдений 11 мая 1979 г.

На рисунке 3 приведена модель ионосферы, созданная согласно описанным выше принципам. Высотно-широтный разрез выше максима-

ма слоя  $F2$  построен по данным ИК-19, а снизу он дополнен по модели IRI с учетом значений  $hmF2$  и  $foF2$ , полученных из ионограмм. Модель приведена для наиболее интересной ионограммы, обозначенной цифрой 2 на рис. 1 и 2. Видно, что фоновая модельная ионосфера заполнена мелкомасштабными неоднородностями для воссоздания эффекта  $F$ -рассеяния на ионограммах. Основные следы характеризуются довольно сильным  $F$ -рассеянием, однако левый край  $O$ -компоненты на всех ионограммах более или менее четкий, что позволяет рассчитать  $N(h)$ -профили с достаточной для данной задачи точностью. Полярная стенка провала моделируется крупномасштабной неоднородностью, вытянутой вдоль силовой линии геомагнитного поля. Предполагается, что ее положение по широте не изменяется. По широте стенка занимает менее  $1^\circ$ , что обеспечивает резкий градиент электронной концентрации  $\sim 2.4 \times 10^5 \text{ см}^{-3}/\text{км}$ . Поскольку первую и последнюю ионограммы с дополнительными земными отражениями разделяет расстояние по долготе более 1000 км, и фоновая ионосфера и неоднородность несколько изменяются по структуре, что учитывалось при расчете модельных ионограмм 1–3. Фоновая ионосфера изменяется так, чтобы соответствовать основным следам на ионограмме, а неоднородность изменяется так, чтобы обеспечить прохождение лучей радиосигнала, формирующих дополнительный земной след.

На рисунке 3 показаны лучевые траектории на частоте 6.9 МГц для обыкновенной компоненты



**Рис. 3.** Основные лучевые траектории для  $O$ -компоненты на частоте 6.9 МГц для ионограммы 2 на рис. 1.

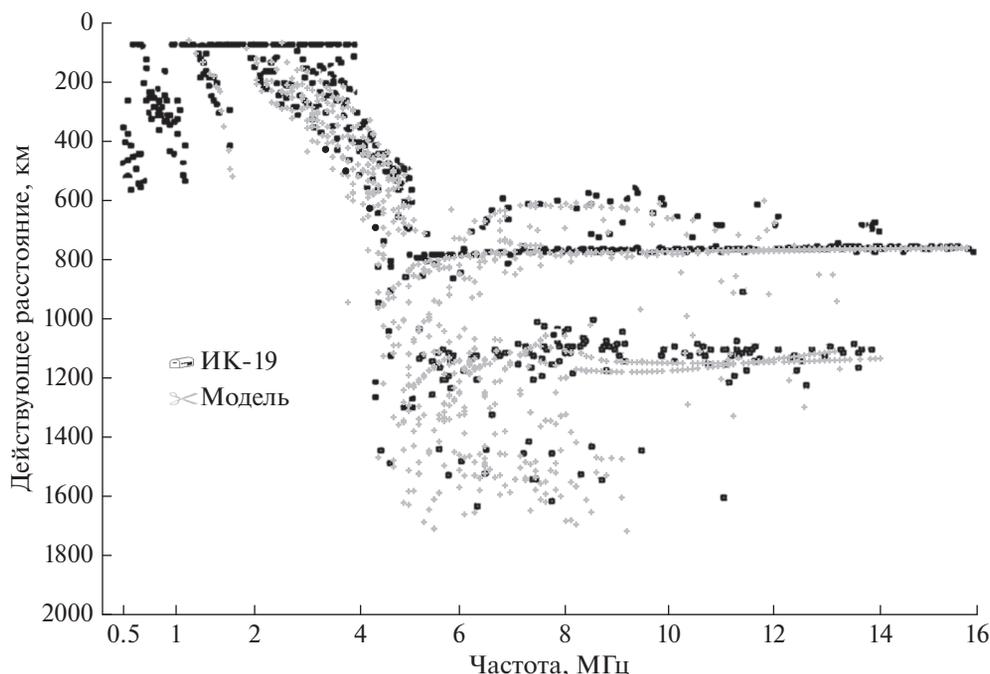


Рис. 4. Модельная ионограмма, наложенная на экспериментальную ионограмму 2.

радиосигнала для ионограммы 2, а на рис. 4 – модельная ионограмма, которую они формируют. Верхний луч, отмеченный цифрой 1, распространяется выше максимума слоя  $F_2$  к неоднородности, отражается от нее и тем же путем возвращается обратно на спутник. Этот луч формирует след на действующей высоте  $\sim 600$  км, поскольку на ионограмме 2 он приходит раньше земного. Действующее расстояние этого луча изменяется соответственно расстоянию до стенки повышенной концентрации. (На ионограмме 3 он расположен дальше земного отражения по действующему расстоянию). След обрывается на частоте  $\sim 12$  МГц, которая соответствует электронной концентрации в максимуме неоднородности. Вертикальный луч 2 формирует основной и земной след  $O$ -компоненты. Основной след сильно рассеянный, поскольку ионосфера в области ночного провала всегда неоднородная. Луч 3, который отражается от стенки, а затем от земной поверхности, как раз образует дополнительный земной след. Ясно, что чем дальше спутник уходит от стенки, тем больше действующее расстояние для этого отражения. На ионограмме 2 дополнительный земной след, довольно сильно рассеянный, находится на действующем расстоянии 1100–1200 км. Луч 4, который неоднородность преломляет вертикально к земной поверхности, не сильно отличается от предыдущего луча по действующему расстоянию, они вместе и формируют дополнительный след. Наконец, есть луч 5, который сначала отражается от земной поверх-

ности, затем от неоднородности, и затем снова от Земли. Семейство этих лучей образует облако отражений на больших расстояниях, в данном случае на 1400–1600 км. Приведенная на рис. 3 схема действительна только для ионограммы 2, она довольно сильно отличается в случае ионограммы 1 или 3, но основные положения этой схемы сохраняются.

На рисунке 4 модельная ионограмма наложена на экспериментальную, что позволяет оценить их подобие и соответственно точность решения обратной задачи. Сильно рассеянные главные следы и  $O$ - и  $X$ -компонент совпадают с экспериментальными, следовательно, неоднородная фоновая ионосфера на рис. 4 воспроизведена достаточно точно. Основной земной след воспроизведен абсолютно точно, но этого нетрудно добиться. Прямое отражение от стенки на экспериментальной ионограмме не четко структурировано на экспериментальной ионограмме (на высотах 600–700 км), но это, вероятно, связано с тем, что в реальности отраженный сигнал также приходит сильно рассеянным. Дополнительные земные отражения достаточно хорошо согласуются и по действующему расстоянию, и по частоте – они обрываются на 14.0–14.5 МГц. (На ионограмме 3 следы обрываются еще раньше – на 12 МГц). Семейство рассеянных следов на модельной ионограмме в интервале 1400–1700 км на экспериментальной ионограмме отражено слабо, что, вероятно, связано с двумя причинами. Во-первых, на цифровых ионограммах ИК-19 регистрировались

только 3 первых отражения, т.е. наблюдался своеобразный эффект экранировки самых дальних отражений. А, во-вторых, далекие следы приемник ионозонда мог просто не регистрировать из-за малой амплитуды сильно ослабленных сигналов.

Таким образом, удалось добиться хорошего совпадения модельной и экспериментальной ионограмм как для главных, так и дополнительных отражений. Они определяются целым семейством лучевых траекторий. Это означает, что построенная модель ионосферы хорошо описывает реальную ситуацию в данном случае. Возможно, предложенная схема не является единственной, но она, во всяком случае, физически обоснована и не противоречит экспериментальным данным.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В высокоширотной ионосфере, наиболее вероятно под действием высыпаний энергичных частиц, формируются тонкие слои неоднородностей с высокой плотностью ионосферной плазмы. При зондировании со спутника они проявляются на ионограммах или в виде необычных главных следов [Данилкин и др., 1991], или как дополнительные отражения от Земли, описанные выше. Эти дополнительные отражения реализуются на основе целого семейства лучевых траекторий, отраженных от стенки повышенной концентрации и переотраженных от земной поверхности. Модельная ионограмма, построенная на основе траекторных расчетов для условий экспе-

римента 11 мая 1979 г., хорошо согласуется с экспериментальной. Это означает, что обратная задача для этого случая была решена вполне успешно.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Данилкин Н.П., Журавлев С.В., Морозова Л.П., Погорелов В.И., Тольский К.Л. Тонкие стенки неоднородностей ионизации в полярной ионосфере, обнаруживаемые методом спутникового радиозондирования // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 31. № 1. С. 137–142. 1991.
- Данилкин Н.П., Котонаева Н.Г., Анишин М.М. Задержанный нижний след на спутниковых ионограммах – новое средство изучения макронеоднородностей ионосферы // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 49. № 1. С. 9–20. 2006.
- Жбанков Г.А., Карпачев А.Т., Телегин В.А., Цыбуля К.Г. Особенности распространения радиоволн со спутника “Интеркосмос-19” в области зимнего гребня ночной экваториальной аномалии // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 50. № 1. С. 123–130. 2010.
- Карпачев А.Т., Жбанков Г.А., Телегин В.А. Выделение крупномасштабной неоднородности в области главного ионосферного провала по данным внешнего зондирования на ИСЗ Интеркосмос-19 // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 52. № 2. С. 219–225. 2012.
- Карпачев А.Т., Жбанков Г.А., Телегин В.А. Удаленные земные отражения на ионограммах ИСЗ “Интеркосмос-19” // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 53. № 6. С. 809–816. 2013.
- Крацов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука. 116 с. 1971.