

УДК 550.338.2

ВЫДЕЛЕНИЕ КРУПНОМАСШТАБНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ В ОБЛАСТИ ГЛАВНОГО ИОНОСФЕРНОГО ПРОВАЛА ПО ДАННЫМ ВНЕШНЕГО ЗОНДИРОВАНИЯ НА ИСЗ “ИНТЕРКОСМОС-19”

© 2012 г. А. Т. Карпачев¹, Г. А. Жбанков², В. А. Телегин¹

¹Учреждение РАН Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН, г. Троицк (Московская обл.)

²НИИ физики Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону

e-mail: karp@izmiran.ru

Поступила в редакцию 19.10.2010 г.

После доработки 20.02.2011 г.

Проанализированы сложные ионограммы внешнего зондирования на ИСЗ “Интеркосмос-19”, которые наблюдались 26 ноября 1980 г. в вечернем секторе (18 LT) на широтах экваториальной стенки (55–62° ШАТ) главного ионосферного провала (ГИП). Они характеризуются наличием двух дополнительных следов на расстояниях больших, чем основные следы. При приближении к минимуму ГИП все следы становятся более рассеянными, сближаются и сливаются в один, сильно диффузный след. Предпринята попытка интерпретации сложных ионограмм на основе траекторных расчетов, проведенных методом характеристик в “комплексном” двумерном варианте (в двух взаимопересекающихся плоскостях). Моделирование показывает, что дополнительные следы могут быть связаны с наличием на экваториальной стенке ГИП крупномасштабной неоднородности, вытянутой вдоль геомагнитного меридиана. Расчеты позволяют оценить параметры неоднородности: интенсивность $\delta f_oF_2 \sim 30\%$, длина несколько сотен километров, полуширина 50–60 км, высота 350 км. Обсуждаются возможные причины образования неоднородности. Усиление диффузности всех следов связано с ростом интенсивности мелкомасштабных неоднородностей, что обычно наблюдается при приближении к минимуму ГИП.

1. ВВЕДЕНИЕ

При внешнем зондировании ионосферы нередко наблюдаются сложные ионограммы, отличающиеся наличием дополнительных следов. Как правило, они связаны с неvertикальным распространением радиоволн в области крупномасштабных структурных особенностей ионосферы. В частности такие ионограммы наблюдаются в области главного ионосферного провала (ГИП) (см., например, [Бенькова и др., 1993]). В данной работе рассмотрена серия последовательных ионограмм с дополнительными следами, которые наблюдались в области ГИП по данным ИСЗ “Интеркосмос-19” (ИК-19) 26 ноября 1980 г. Главная цель работы – смоделировать структуру ионосферы, которая обусловила формирование этих следов, и с помощью траекторных расчетов получить модельные ионограммы, наиболее близко соответствующие экспериментальным.

2. ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ

Ионограммы ИСЗ ИК-19 были получены в аналоговом режиме при зондировании ионосферы в пределах зоны видимости приемного пункта Москва. В этом режиме работы спутника интервал между сеансами зондирования составлял 8 с, что

по расстоянию вдоль орбиты составляет около 50 км, а по широте 0.5°. Вопросы формирования ионограмм внешнего зондирования подробно рассмотрены в сборниках [Труды ..., 1969; Аппаратура ..., 1980], поэтому напомним только, что ионограмма представляет собой график зависимости действующего (эффективного) расстояния от частоты зондирования. На ионограмме обычно фиксируются следы обыкновенной O , необыкновенных Z и X компонент, а также отражения от Земли. Земной след на аналоговой ионограмме фиксируется плохо на фоне помех, создаваемых наземными станциями. Все следы начинаются с действующего расстояния 80 км, что эквивалентно длительности импульса передатчика, на время которого приемник ионозонда заперся по входу. Поскольку спутниковый ионозонд, в отличие от наземного, погружен в плазму, отражения начинаются с частоты отсечки, для обыкновенной компоненты частота отсечки равна плазменной частоте.

На рисунке 1 приведено для примера 5 наиболее характерных ионограмм внешнего зондирования, полученных в области ГИП 26 ноября 1980 г. Мировое время наблюдений 14:29:00–14:35:15 ч, местное время около 18:00 ч, долготы 45–70°Е, высота спутника 950–960 км. Для удобства анали-

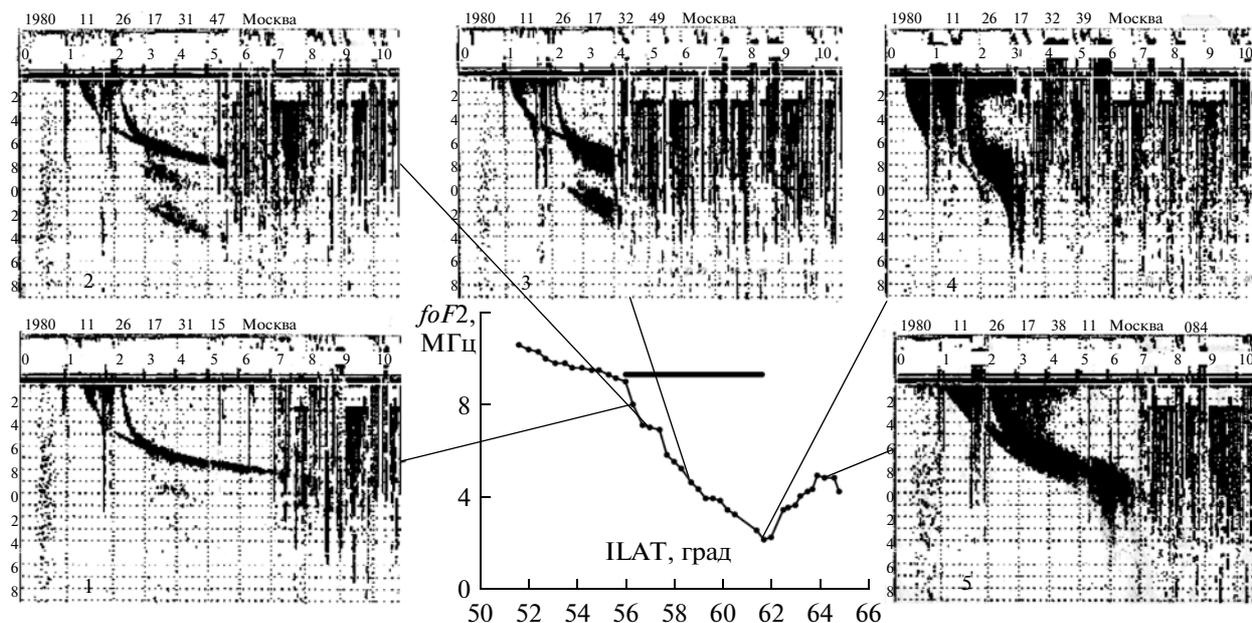


Рис. 1. Ионограммы спутника ИК-19 и широтный разрез $foF2$ в области провала ионизации. На ионограммах по оси X отложена зондирующая частота в МГц, по оси Y – действующее расстояние в сотнях километров. Жирным отрезком на графике показана область, в которой наблюдались дополнительные следы.

за внизу, в середине рис. 1, приведены вариации $foF2$ вдоль орбиты спутника. Видно, что слабые дополнительные следы впервые появились на ионограмме 1, которая была получена у вершины экваториальной стенки провала (ЭСП). При продвижении спутника вдоль ЭСП к более высоким широтам следы становятся все более интенсивными, при этом четко выделяются оба луча – обыкновенный и необыкновенный (2). При дальнейшем движении спутника все следы, и основной, и дополнительные, становятся все более диффузными, при этом дальность ближайшего следа уменьшается, и он в результате сливается с основным (3). В минимуме провала все следы сливаются в один, сильно диффузный след (4). Однако, несмотря на сильное F -рассеяние, критические частоты $foF2$ и $fxF2$ определяются довольно точно. Сказанное относится даже к чрезвычайно диффузной ионограмме, которая была получена на полярной стенке провала (5).

3. МОДЕЛЬ ИОНОСФЕРЫ

Для проведения траекторных расчетов необходимо построить модельное распределение электронной концентрации в области провала. Решение этой задачи затрудняют три проблемы: сильное F -рассеяние, наличие шумов ниже критической частоты и неперпендикулярное распространение радиоволн. К счастью, несмотря на сильное F -рассеяние, нижний край следа обыкновенной волны и критическую частоту удается определить довольно точно даже на полярной стенке. Шумы ниже критиче-

ской частоты наблюдаются на экваториальной стенке провала, что хорошо видно на ионограмме 2 на рис. 1. Это связано с проникновением сигналов наземных радиостанций в минимуме провала, где концентрация гораздо ниже, чем на экваториальной стенке [Бенькова и др., 1993]. При известном опыте обработки зашумленных ионограмм удастся решить и эту проблему. Это позволило рассчитать $N(h)$ -профили внешней ионосферы для всех ионограмм, полученных 25 ноября, и с помощью интерполяции сплайнами построить широтно-высотный разрез внешней ионосферы вдоль орбиты спутника. Затем была проведена коррекция полученного разреза с учетом того, что на крутой экваториальной стенке ГИП отражения являются на самом деле наклонными. Наконец для большей наглядности, нижняя часть профиля дорабатывалась по модели IRI. Полученный таким образом высотно-широтный разрез ионосферы в области ГИП для рассматриваемого случая приведен на рис. 2. Он обеспечивает практически полное совпадение основных следов на всех ионограммах, экспериментальных и рассчитанных теоретически, как будет показано ниже (см. раздел 4).

Для воссоздания структуры внешней ионосферы, которая обеспечила формирование дополнительных следов, необходимо четко выделить критерии, которые ее определяют. Перечислим их.

1) Дополнительные следы до слияния с основным в минимуме провала наблюдаются по времени в течение примерно 1 мин 50 с, что составляет ~700 км вдоль орбиты спутника. Таким образом,

мы имеем дело с отражениями от крупномасштабной структуры, расположенной на экваториальной стенке провала.

2) Дополнительные следы на всех ионограммах подобны и связаны общей динамикой, поэтому отражения идут не от разных неоднородностей, а от одной, крупномасштабной, неоднородности.

3) Оба дополнительных следа достаточно четкие, особенно вдали от провала, следовательно неоднородность одиночная, и область отражения от нее компактна. В случае, если бы это была группа каких-то небольших возмущений, то обязательно бы присутствовало отражение от нескольких соседних, что привело бы к сильной размытости отраженного сигнала.

4) Оба дополнительных следа имеют значительную протяженность в частотном диапазоне, невозможно представить случайно совпавшие отражения от независимых областей в разных местах, следовательно, присутствует одна мощная неоднородность.

Перечисленные выше критерии однозначно говорят в пользу наличия одиночной крупномасштабной неоднородности.

5) Расстояние от основного до дополнительных следов значительное — неоднородность расположена в стороне от трассы спутника, что приводит к дополнительному набегу группового пути.

6) Первый след появляется одной ионограммой раньше, чем второй, и быстрее становится более интенсивным. Рост интенсивности обоих дополнительных отражений означает, что спутник по мере продвижения к минимуму провала приближается к области этих отражений.

7) Оба дополнительных следа существуют до слияния их с основным следом в минимуме провала.

8) Дальность отражений для первого следа со временем уменьшается на ~100 км, так что он приближается к основному, расплывается и сливается с ним в минимуме ГИП. Второй след расположен на практически постоянной дальности, которая на частоте 3 МГц составляет ~1200 км.

9) Следы начинаются на частотах, гораздо меньших критической, следовательно неоднородность находится на высотах выше $hmF2$.

Критерии 5–9 определяют расположение неоднородности.

10) Оба следа наклонные, что означает проникновение радиосигнала в более плотные слои неоднородности с ростом частоты, т.е. мы имеем дело с неоднородностью положительного знака.

11) Оба следа начинаются на одной и той же частоте — вначале на ~3 МГц, а к концу наблюдений на ~1.5 МГц.

12) В начале наблюдений первый след закачивается на частоте ~4 МГц, а второй на ~5 МГц, а к

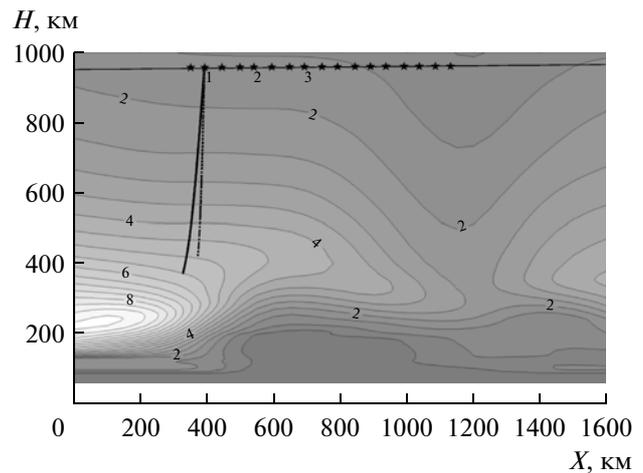


Рис. 2. Разрез ионосферы вдоль орбиты спутника. Изолинии приведены в МГц. Кривая сверху — орбита спутника, звездочками на ней отмечены места регистрации ионограммы с дополнительными следами. Сплошная кривая — лучевая траектория для обыкновенной волны, пунктирная — для необыкновенной волны при зондировании на частоте 5.5 МГц.

концу периода оба заканчиваются на частоте основного следа ~3 МГц. Это означает, что концентрация неоднородности в минимуме провала сравнивается с фоновой.

13) Максимальная частота дополнительного следа определяет максимальную концентрацию неоднородности.

Критерии 10–13 определяют знак и мощность неоднородности.

14) Следы на первых ионограммах обрываются, не доходя до критической частоты $F2$ -слоя.

15) Наблюдается не один, а два дополнительных следа, все это накладывает дополнительные требования к неоднородности, что позволяет конкретизировать ее форму.

16) Диффузность всех следов увеличивается к минимуму провала, это связано с ростом мелко-масштабных неоднородностей, вызывающих F -рассеяние.

Был проведен поиск структуры в ионосфере, способной удовлетворить всему набору характеристик эксперимента. Это фактически определяет единственность решения, поскольку трудно представить, что такому большому набору критериев может соответствовать не одна структура в ионосфере. В качестве таких структур рассматривались неоднородности, вытянутые вдоль магнитного поля, “канавы” ионизации по обеим сторонам от спутника, ямы и пики ионизации, вытянутые вдоль минимума провала и т.д. Единственной структурой, которая удовлетворяет всем перечисленным выше условиям, является крупномасштабная неоднородность, вытянутая

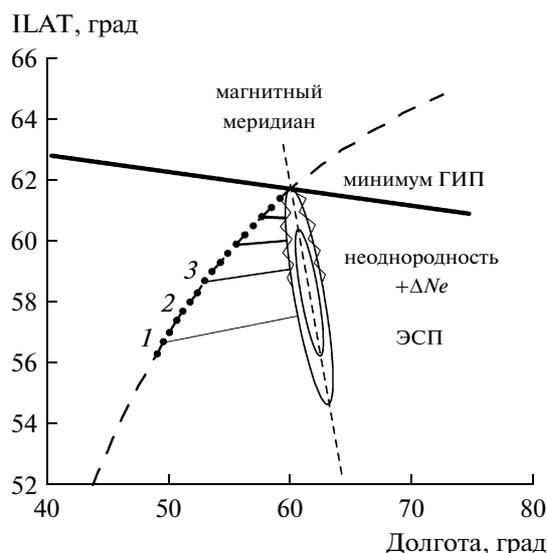


Рис. 3. Расположение неоднородности в горизонтальной плоскости. Штриховая кривая — орбита спутника, точки — места регистрации ионограммы с дополнительными следами, штриховая прямая — магнитный меридиан, жирная прямая — положение минимума ГИП.

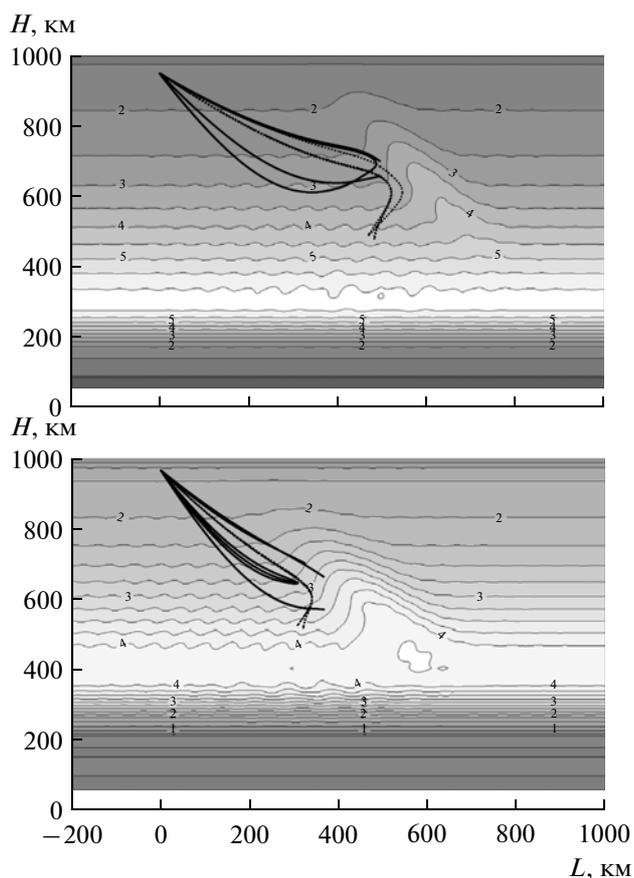


Рис. 4. Сечения ионосферы в плоскости, перпендикулярной к неоднородности, сверху для ионограммы 1, внизу для ионограммы 3. Сплошными кривыми показаны лучи, формирующие первый дополнительный след, пунктирными кривыми — второй дополнительный след. Изолинии приведены в МГц.

вдоль меридиана на экваториальной стенке провала. На рисунке 3 показано расположение этой неоднородности в горизонтальной плоскости. Рисунок является схематическим, поскольку спутник расположен на высоте ~ 950 км, а неоднородность концентрации занимает широкий диапазон высот, как будет показано ниже. Поэтому в реальности лучи от спутника уходят вправо и вниз. Положение минимума ГИП (и его полярной стенки) приведено с учетом истинного положения минимума на широте $\sim 62^\circ$ ШЛАТ, а наклон прямой определяется зависимостью от местного времени по модели [Karpatchev et al., 1996]. Неоднородность вытянута вдоль магнитного меридиана, поскольку предположительно неоднородность формируется именно в этом направлении, но самое главное, такое расположение неоднородности позволяет обеспечить необходимые действующие расстояния для дополнительных следов. На рисунке 3 неоднородность представлена в симметричной форме. Это не следует из условий эксперимента и сделано, главным образом, из физических соображений и способа задания неоднородности.

Высокоширотный край структуры изрезан мелкомасштабными неоднородностями, которые формируют сильное F -рассеяние в минимуме провала и на его полярной стенке, что является типичным для неосвещенных условий. Представленная на рис. 3 схема позволяет объяснить главные особенности эксперимента на ИК-19: рост интенсивности отраженных сигналов и уменьшения действующего расстояния для первого дополнительного следа по мере приближения к неоднородности, рост интенсивности F -рассеяния по мере приближения к минимуму провала, длительный период наблюдений дополнительных следов, а также слияние всех следов в один в минимуме провала.

Рисунок 3 представляет качественную картину эксперимента, количественные характеристики неоднородности, которые обеспечивают наблюдаемые частоты и действующие расстояния дополнительных следов на ионограммах, приведены на рис. 4. На этом рисунке приведены два разреза ионосферы в плоскости, перпендикулярной к стенке неоднородности. Разрезы сделаны для ионограмм, обозначенных на рис. 2 цифрами 1 и 3. В максимуме неоднородности $\delta f_o F_2$ достигает $\sim 30\%$ ($\delta Ne \sim 70\%$). Ее полуширина составляет 50–70 км (если представлять неоднородность симметричной). Поскольку для ионограммы 3 плоскость разреза неоднородности сильно наклонена к ее оси, неоднородность в этом сечении выглядит шире, чем для ионограммы 1, но в горизонтальной плоскости неоднородность сужается к концу наблюдений, как это видно из рис. 3. Из геометрии эксперимента можно приближенно оценить длину неоднород-

ности в несколько сотен километров. Неоднородность наклонена к спутнику, что обеспечивает возврат лучей к нему. Неоднородность расположена выше максимума слоя $F2$ и простирается до высоты ~ 800 км, что определяется минимальной и максимальной частотой дополнительных следов.

4. МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ И СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ

Процесс моделирования ионограмм заключается в нахождении лучей, вернувшихся обратно в точку излучения. Отличительной особенностью данного случая является то, что основной и дополнительные следы на ионограммах связаны с независимыми структурами, расположенными на значительном расстоянии. На основной след, как было указано выше оказывает влияние провал и связанный с ним градиент электронной концентрации (см. рис. 2). В то же время появление дополнительных следов вызвано наличием крупномасштабной неоднородности, расположенной в стороне от траектории спутника. В таком случае целесообразно использовать трехмерную модель ионосферы и решать граничную задачу в виде

$$D(f, \Delta_0, \varphi_0) = 0, \quad (1)$$

где $D(f, \Delta_0, \varphi_0)$ – длина дуги, соединяющей начальную и конечную точки траектории при $R = R_{sat}$, как функция угла места волнового вектора Δ_0 в момент излучения, его азимутального угла φ_0 и рабочей частоты f , т.е. расстояние от спутника до точки пересечения траектории с его орбитой.

Однако на данном пути мы сталкиваемся с противоречием. С одной стороны, необходимо найти максимальное число существующих решений, которые, как будет показано ниже, часто близки друг к другу, но относятся к разным следам. С другой стороны, не существует методов поиска всех корней уравнения с несколькими переменными. Многие лучи, особенно лежащие в компактной области значений (Δ_0, φ_0) , будут потеряны. Данное противоречие можно снять только с помощью “комплексного” $2D$ -метода. Он заключается в следующем. Расчет основного и дополнительных следов проводится независимо в двумерном варианте, наилучшим образом описывающим структуру, ответственную за них. Тогда для основного следа это будет плоскость, направленная вдоль градиента ΔNe , созданного на ЭСП. А для дополнительных следов – плоскость, проходящая через спутник и перпендикулярная к поверхности равной концентрации, связанной с крупномасштабной неоднородностью. Взаимное расположение этих плоскостей может быть любым, в том числе и перпендикулярным. Кроме того, чтобы избежать трехмерного варианта, связанного с тем, что среда является магнитоак-

тивной, магнитное поле учитывается приближенно с помощью частотных поправок.

Тогда для каждой моды решается граничная задача в виде:

$$D(f, \Delta_0) = 0. \quad (2)$$

Поиск всех корней данного уравнения проводится методом дихотомии и секущих. В связи с тем, что ионосфера представляет собой неоднородную среду, решение в которой нельзя найти аналитически, для расчета лучевых траекторий используется прием, получивший в отечественной литературе название метода характеристик [Кравцов и Орлов, 1971; Гершман и др., 1984]. Он основан на численном решении локального дисперсионного уравнения путем приведения его к системе дифференциальных характеристических уравнений относительно пространственных и лучевых координат.

Результаты расчетов представлены на рис. 2 и рис. 4. Рисунок 2 отчетливо показывает влияние градиента электронной концентрации на “вертикальное” отражение, изменяя угол места Δ_0 на величину порядка 10° . На рисунке 4 показан механизм образования дополнительных следов. Первый след образуют лучи, отраженные от самой стенки неоднородности (сплошные кривые). Их действующая дальность напрямую связана с расстоянием от спутника до неоднородности, что позволяет определить расположение неоднородности. Второй (нижний) след формируют лучи, лишь искривленные под влиянием неоднородности. Их отражение происходит от “основной” ионосферы (пунктирные кривые). Вследствие такой геометрии время распространения этих лучей гораздо больше и слабо зависит от изменения расстояния до неоднородности, что и наблюдается на ионограммах. Стоит заметить, что лучи, формирующие оба следа, расположены компактно и составляют один объемный пучок. Это и приводит к указанному выше противоречию в методике решения задачи.

Заметим также, что при наличии только одной неоднородности, полученные следы были бы узкими и четкими. Однако на ионограммах все они имеют признаки диффузности, причем она увеличивается с приближением к минимуму провала. Это связано с ростом мелкомасштабных неоднородностей, вызывающих F -рассеяние. Генерация таких неоднородностей происходит в районе ГИП, и их мощность растет с приближением к минимуму провала и далее к его полярной стенке. Это явление учтено в нашей модели ионосферы введением волновых возмущений Ne различной амплитуды на обоих этапах расчетов. В результате происходит уширение (расплывание) следов с приближением к ГИП, что улучшает совпадение с экспериментальными данными.

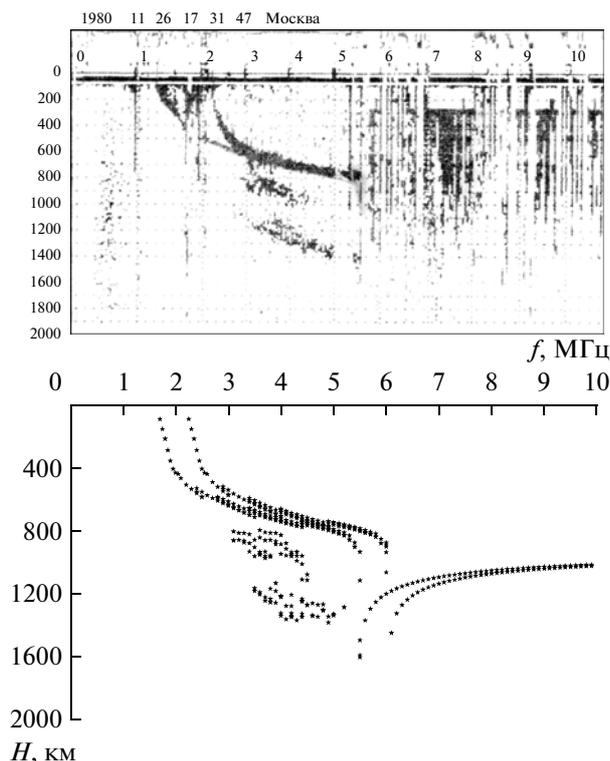


Рис. 5. Вверху ионограмма 2, полученная на ИСЗ ИК-19 в 17:31:47 UT, внизу — соответствующая ей рассчитанная ионограмма.

Таким образом, используя “комплексный” 2D-метод моделирования, мы получаем соответствие между экспериментальными и рассчитанными ионограммами. Это относится как к дальности следов, так и к их форме. На рисунке 5 для примера приведена ионограмма 2 — экспериментальная и рассчитанная. Как видно из рисунка, наблюдается хорошее соответствие между экспериментальными и рассчитанными следами, как по частотам, так и по действующим расстояниям. Напомним, что земной след на аналоговой ионограмме спутника ИК-19 обычно полностью маскируется шумами.

5. ПРИЧИНЫ ОБРАЗОВАНИЯ НЕОДНОРОДНОСТИ

Обсудим возможные причины образования неоднородности. На рисунке 6 представлена геомагнитная обстановка в период наблюдений 26 ноября 1980 г. Период был достаточно возмущенным — Kp -индекс достигал 4+. Возмущение (суббурия) было инициировано поворотом B_z -компоненты ММП к югу около 10 UT. Затем B_z -компонента повернулась к северу, что обычно сопровождается проникновением магнитосферного электрического поля в ионосферу. Эффект электрического поля явно прослеживается на рис. 4, поскольку

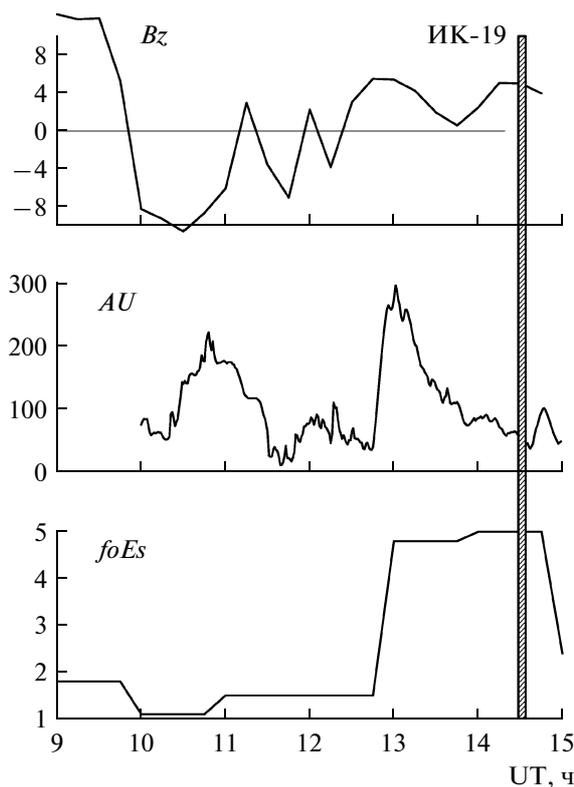


Рис. 6. Вариации B_z -компоненты ММП, индекса авроральной активности AU и критической частоты $foEs$ спорадического слоя Es по данным ст. Норильск для 26 ноября 1980 г. Заштрихованной полосой обозначен период наблюдений на спутнике ИК-19.

только дрейф плазмы в скрещенных полях может привести к наклону неоднородности. Поворот B_z к югу сопровождался также всплеском AU -индекса. AU -индекс описывает динамику восточного электроджета в вечернем секторе ионосферы, т.е. как раз там, где наблюдался провал. Рост интенсивности электроджета как правило связан с высыпаниями частиц. Высыпания частиц сопровождаются образованием спорадического слоя Es , который фиксируют наземные станции. Ближайшей к области наблюдений станцией, которая работала в это время, оказался Норильск ($69.4^\circ N$, $58.6^\circ MLAT$, $88.1^\circ E$). Ее данные действительно показывают наличие мощного спорадического слоя Es , который образовался как раз после всплеска AU -индекса и существовал во время наблюдений на спутнике — рис. 6. Наконец, резкий всплеск интенсивности электроджета даже небольшой интенсивности всегда сопровождается генерацией ВГВ, разогревом термосферы и увеличением скорости нейтрального ветра, направленного к экватору. Таким образом, в образовании неоднородности, вероятно, участвовало несколько причин — электрическое поле, высыпания частиц и нейтральный ветер, как квазистационарный, так и квазиволновой (ВГВ). Такое сочетание

факторов, по-видимому, является довольно редким, поскольку двойные следы, как на обсуждаемых ионограммах, были зафиксированы всего в трех случаях при зондировании над наземным пунктом Москва.

6. ВЫВОДЫ

Проанализированы ионограммы внешнего зондирования спутника ИК-19 с дополнительными следами в области ГИП. Показано, что они формируются отражениями от крупномасштабной неоднородности, расположенной на экваториальной стенке ГИП. По характеристикам дополнительных следов (частотам, высотам и периоду наблюдений) построена модель неоднородности. Неоднородность расположена на экваториальной стенке провала, вытянута на сотни километров вдоль геомагнитного меридиана и на 350 км по высоте. В максимуме неоднородности δf_oF_2 достигает ~30%. Неоднородность, несомненно, была сформирована во время геомагнитного возмущения (суббури). В ее формировании, по-видимому, участвовало несколько причин – электрическое поле, высыпания частиц и нейтральный ветер.

Траекторные расчеты показывают хорошее согласие между экспериментальными и рассчитанными ионограммами. Расчеты были проведены методом характеристик с помощью “комплексного” 2D-метода, при котором расчет основного

и дополнительных следов проводится независимо в двумерном варианте, наилучшим образом описывающим структуру, ответственную за них. Для основного следа это плоскость, направленная вдоль градиента ΔNe , созданного на экваториальной стенке провала, а для дополнительных следов – плоскость, проходящая через спутник и перпендикулярная к поверхности равной концентрации, связанной с крупномасштабной неоднородностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бенькова Н.П., Козлов Е.Ф., Коченова Н.А., Саморкин Н.И., Флигель М.Д. Структура субавроральной ионосферы. М.: Наука. 144 с. 1993.
- Труды Ин-та инженеров по электротехнике и радиоэлектронике. Ред. М.Н. Фаткуллин. М.: Мир. Т. 57. № 6. 650 с. 1969.
- Аппаратура для исследования внешней ионосферы. Ред. Г.В. Васильев и Ю.В. Кушнеревский. М.: ИЗМИРАН. 303 с. 1980.
- Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука. 304 с. 1980.
- Гершман Б.Н., Ерухимов Л.М., Яшин Ю.Я. Волновые явления в ионосфере и космической плазме. М.: Наука. 392 с. 1984.
- Karpachev A.T., Deminov M.G., Afonin V.V. Model of the mid-latitude ionospheric trough on the base of Cosmos-900 and Intercosmos-19 satellites data // Adv. Space Res. V. 18. № 6. P. 221–230. 1996.