

УДК 50.388.2

ТРАНСИОНОСФЕРНОЕ РАДИОЗОНДИРОВАНИЕ - ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ИОНОГРАММ ПРИ ОДНОМ ПРОХОЖДЕНИИ ИСЗ НАД НАЗЕМНОЙ СТАНЦИЕЙ

Н.П. Данилкин, Г.А. Жбанков, С.В. Журавлев, Н.Г. Котонаева

Рассмотрено с использованием ранее введенного модельного приближения изменение трансionoсферных траекторий для случая перемещения ИСЗ над неподвижной наземной ионосферной станцией. Показано, что характер изменения соответствующих трансionoграмм позволяет более детально и качественно, чем при получении одиночных ионограмм, рассмотреть вопросы определения количества изолированных ионосферных неоднородностей средних величин, а также оценить их размеры.

Ключевые слова: ионосферные радиоволны, диагностика ионосферы, ионосферные неоднородности, движение ИСЗ, метод трансionoсферного зондирования, граничные задачи, геометрическая оптика, отражение радиоволн от Земли.

ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] было показано, что наличие ионосферных неоднородностей в «зоне ответственности» трансionoсферных траекторий приводит к появлению на трансionoграммах дополнительных к основной ионограмме треков сигналов, прошедших ионосферу насквозь и зарегистрированных приемной наземной станцией. В зависимости от расположения неоднородности относительно ИСЗ и положения наземной станции трансionoграммы имеют различный вид. Дополнительные треки на ионограммах отличаются, как по количеству, так и по виду и по характерным частотам, на которых они наблюдаются. При этом анализ отдельно взятых трансionoграмм показывает, что по ним можно судить только о факте наличия ионосферных неоднородностей и затруднительно высказывать те или иные соображения об их форме, размерах и контрастности. Однако можно ожидать, что наличие серии трансionoграмм, которые регистрируются при одном прохождении ИСЗ в зоне видимости наземной станции значительно расширяет возможности диагностики ионосферных неоднородностей.

Настоящая работа и посвящена математическому моделированию второго этапа нового эксперимента по трансionoсферному радиозондированию (ТИЗ) с высот больших высоты её главного максимума. Проведено моделирование ионограмм ТИЗ на серии последовательных сеансов зондирования в условиях неоднородной ионосферы при наличии в ней не-

однородностей средних размеров с построением возможных траекторий, а также получением и анализом соответствующих трансionoграмм.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В целом вся проблематика организации и проведения трансionoсферного эксперимента, основанная на реальных экспериментальных данных, полученных в трех предшествующих космических экспериментах – Интеркосмос-19, Космос 1809 и данных работы ионозонда на пилотируемой космической станции МИР - описана в работах [2-5]. Однако в настоящее время при подготовке нового космического эксперимента по ТИЗ необходимо учитывать новые знания, полученные в последние годы. Важнейшим из них является объяснение ионограмм с, так называемым, задержанным нижним следом (ЗНС). Своим происхождением ЗНС обязано наклонному отражению зондирующих ионосферу радиоволн с возвращением на ИСЗ после отражения от горизонтальных градиентов электронной концентрации вблизи максимума ионосферы. Первоначально такие траектории радиоволн были найдены на ионограммах станции МИР, когда она находилась ниже максимума ионосферы [6], а впоследствии также и на ионограммах ИСЗ Интеркосмос-19 [7], который летал на высотах значительно больших, чем высота максимума ионосферы.

Учтем, что ИСЗ и ионосферная неоднородность находятся в движении относительно

неподвижной наземной станции. Однако скорость движения ИСЗ значительно выше скорости движения плазменных образований и поэтому на первом этапе можно рассматривать задачу, в которой движется только ИСЗ относительно неподвижных ионосферных плазменных образований и наземной станции.

Выберем две ионосферные модели для использования в расчетах. Одну условно назовем «облако», вторую также условно назовем

«ступенька». На рис. 1 представлены пространственные распределения электронной плотности в обоих случаях. Отметим, что «облако» может быть как положительным, так и отрицательным. В первом случае электронная концентрация от границ «облака» внутрь увеличивается, а во втором уменьшается. «Ступеньку» можно рассматривать как его предельный случай.

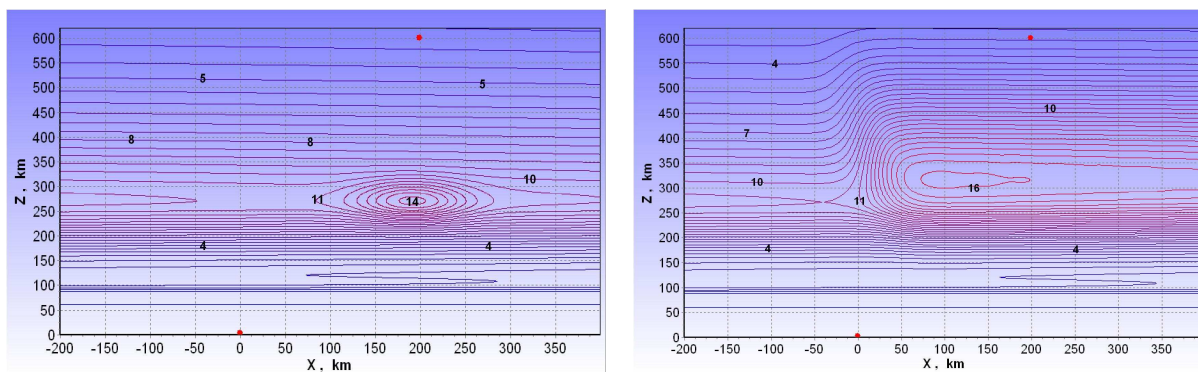


Рис. 1. Пространственное распределение электронной плотности для случаев: «облако» (левый фрагмент) и «ступенька» (правый фрагмент). Изолинии минимальной плазменной частоты отображаются синим цветом, максимальной – красным. На изолиниях показаны величины плазменной частоты. Красные точки показывают расположение ИСЗ и наземной станции.

2. РЕШЕНИЕ

2.1. Модель ионосферы и метод расчета траекторий радиоволн

Детально способ задания ионосферной модели и построения в ней теоретической трансionoграммы описан в нашей предыдущей статье [1]. Поэтому укажем только основные моменты.

Процесс построения модельной трансionoграммы сводится к решению граничной задачи по поиску всех лучей, вышедших из точки излучения и пришедших в пункт наблюдения для каждой частоты зондирования.

При расчетах используется двумерно-неоднородная модель распределения электронной концентрации в ионосфере вдоль выделенной плоскости, определяемой спутником, точкой приема и центром Земли. Распределение N_e вдоль плоскости задается в виде суммы базовой, невозмущенной части и дополнительного возмущения: $N_e = N_0(1+\delta)$, где N_0 – базовая часть, а δ – описывает возмущенную и задается в виде суммы эллипсоидов:

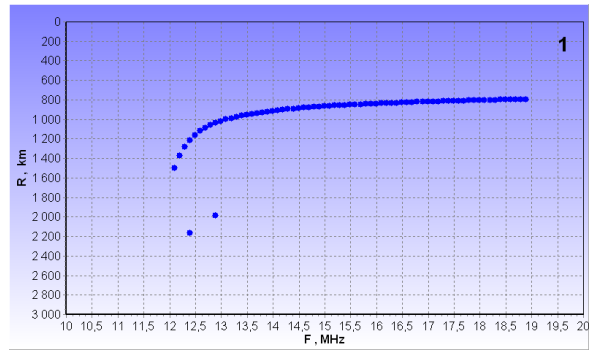
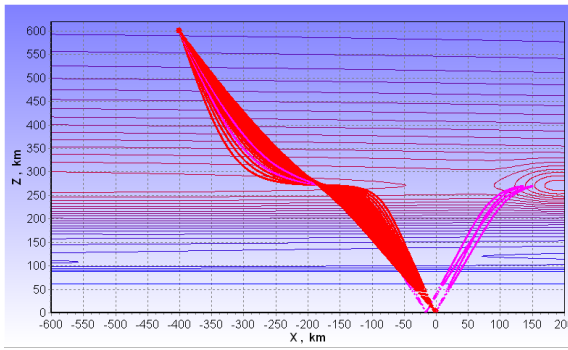
$$\delta = \sum_i dN_i \cdot \exp \left\{ - \left(\frac{x - x_{0i}}{Lx_i} \right)^2 - \left(\frac{z - z_{0i}}{Lz_i} \right)^2 \right\}$$

с центрами в точке (x_{0i}, z_{0i}) и масштабами (Lx_i, Lz_i) .

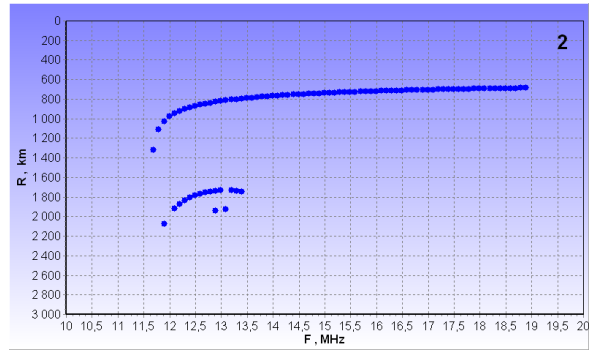
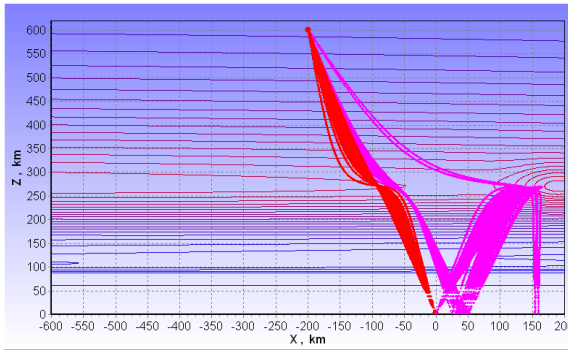
Траектории в описанной выше ионосфере рассчитываются методом характеристик, основанном на численном решении локального дисперсионного уравнения путем приведения его к системе дифференциальных уравнений относительно пространственных и лучевых координат [8, 9].

2.2. Вариант одного облака.

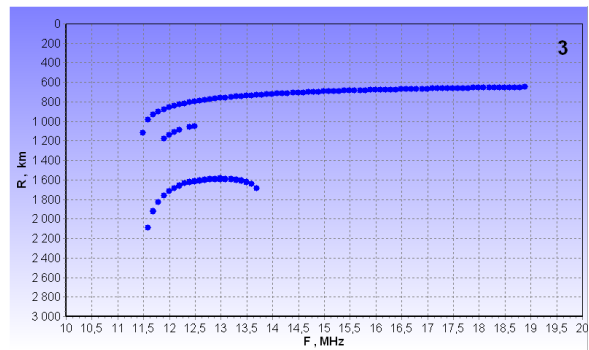
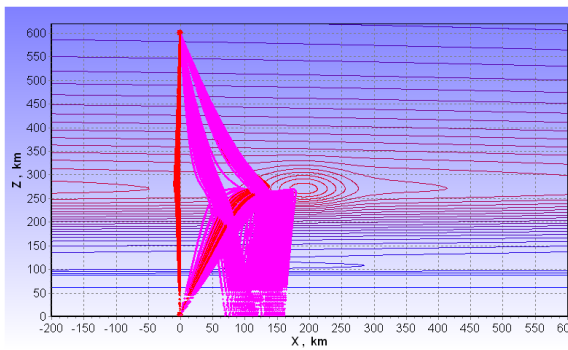
Рассмотрим неоднородность с контрастностью $dN/N=50\%$ и характерными масштабами порядка 50 км, которая первоначально расположена на расстоянии $X=200$ км от станции. Далее проведем спутник на высоте 600 км относительно этой неподвижной неоднородности и неподвижной наземной станции. Соответствующая последовательность событий приведена на рис. 2, где на правых фрагментах представлены трансionoграммы, а на левых фрагментах соответствующие траектории радиоволн. Шаг от одной ионограммы к другой ионограмме равен 200 км. Заметим при этом, что в реальных условиях съемку ионограмм можно проводить через каждые 50 км.



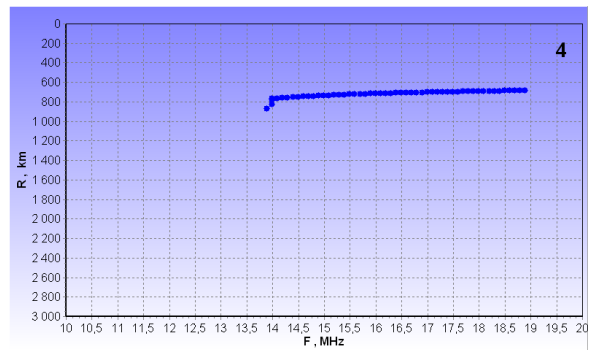
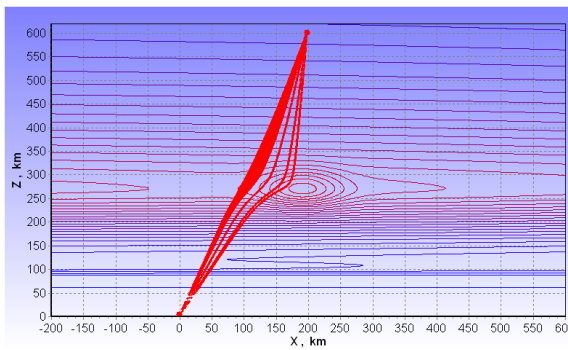
-400 км



-200 км



0 км



200 км

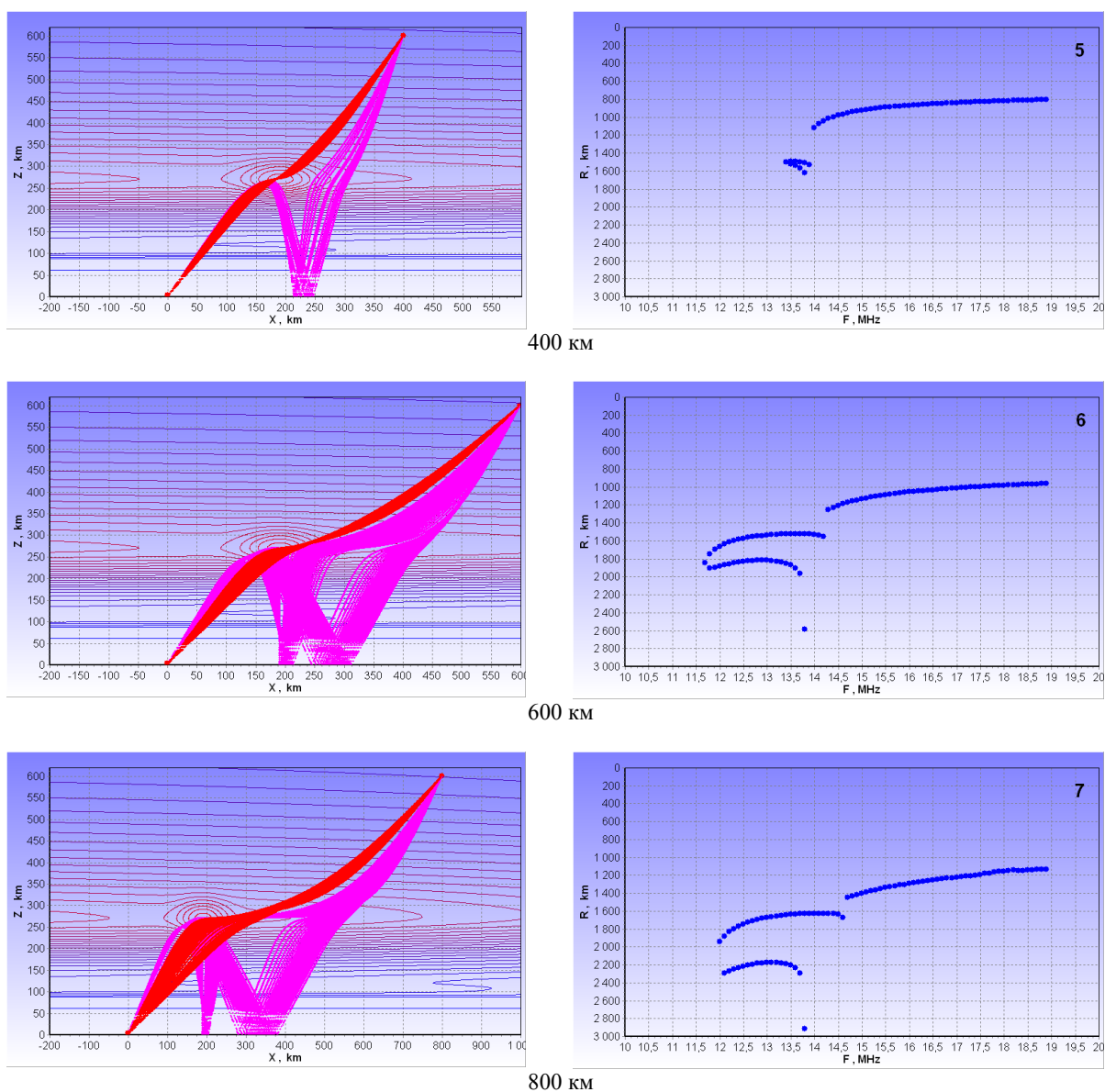


Рис. 2. Серия 7 последовательных ионограмм (через каждые 200 км) и расположение соответствующих траекторий для случая одной неоднородности и перемещения ИСЗ над ней на расстояние 1200 км. Изолинии плазменных частот одинаковы для всех фрагментов и указаны на рисунке 1. Здесь и ниже прямые траектории отображены красным цветом, траектории с отражением от Земли – розовым.

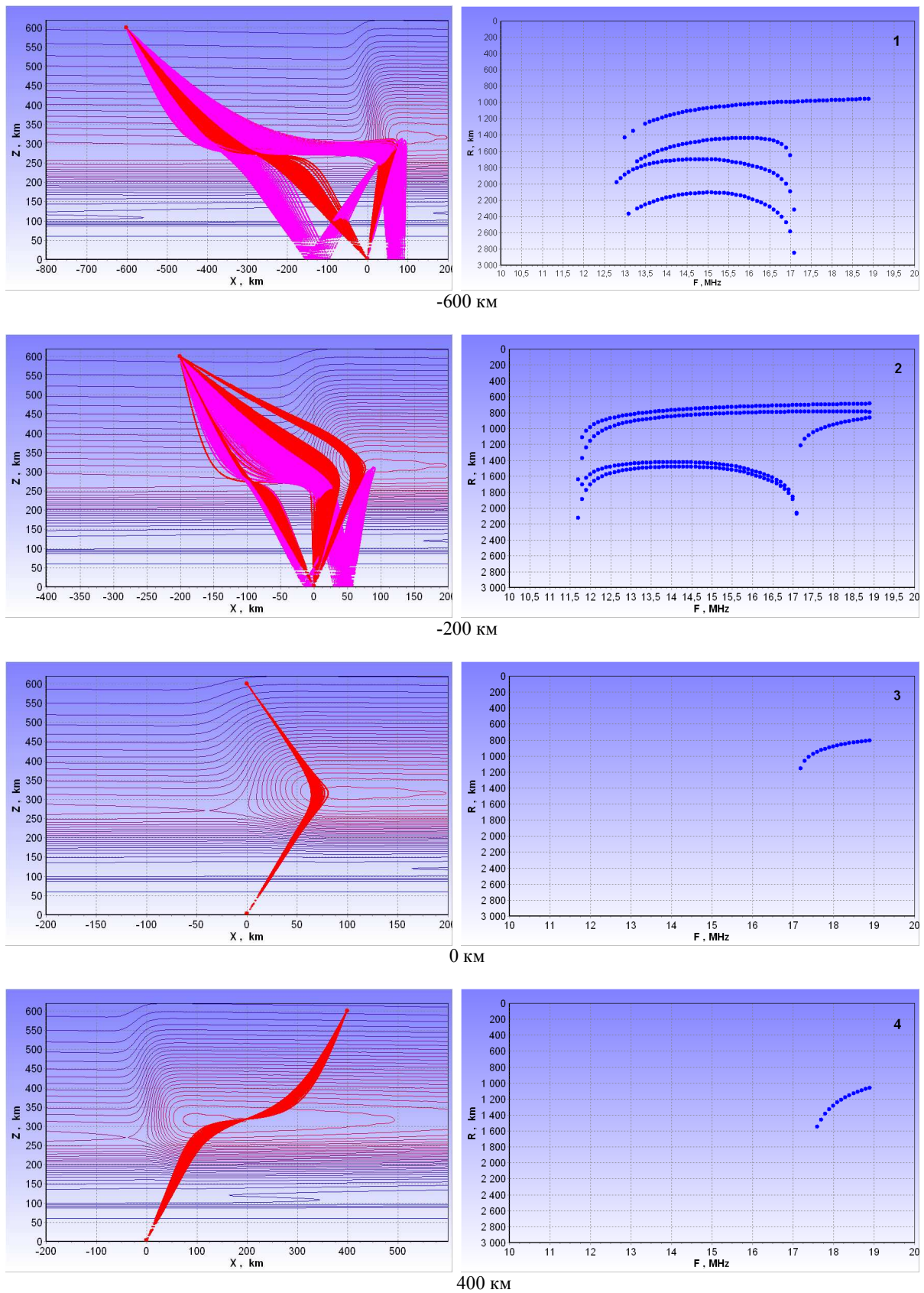


Рис. 3. Серия последовательных ионограмм и расположение соответствующих траекторий для случая «ступеньки» и перемещения ИСЗ над ней.

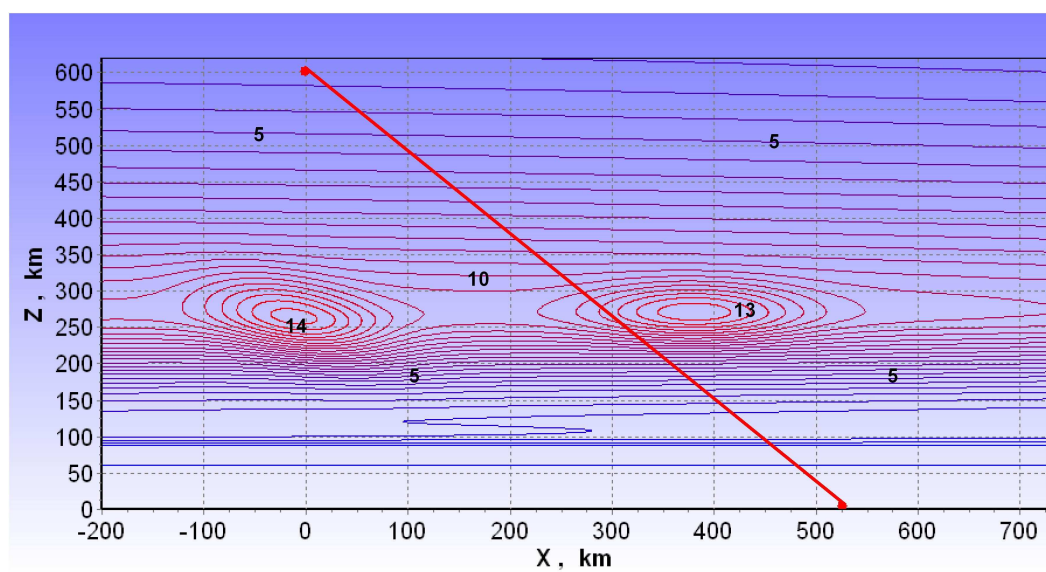


Рис. 4. Графическая иллюстрация варианта неоднородностей типа “облако” с двумя объектами. Наклонная линия показывает траекторию распространения между приемником и передатчиком, к которой будут стремиться траектории радиоволн при увеличении частоты зондирования.

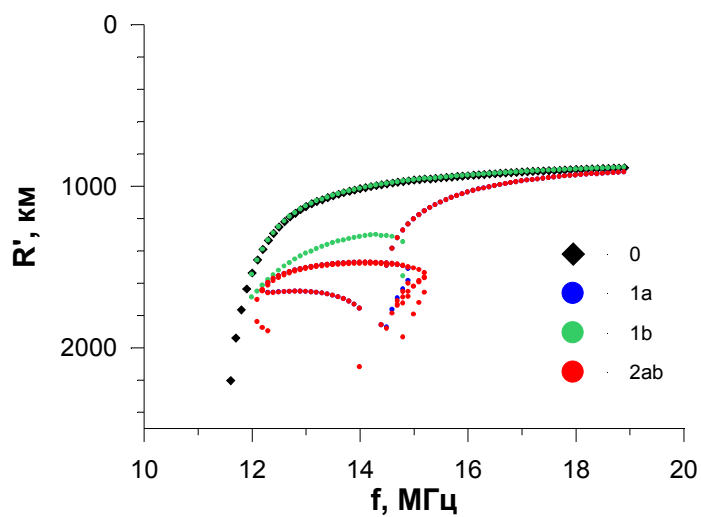


Рис. 5. Представлены ионограммы для четырех вариантов данной ситуации, которые обозначены: *0* – спокойная ионосфера без неоднородностей, *1a* – присутствует только правая неоднородность, *1b* – присутствует только левая неоднородность (под спутником), *2ab* – присутствуют обе неоднородности

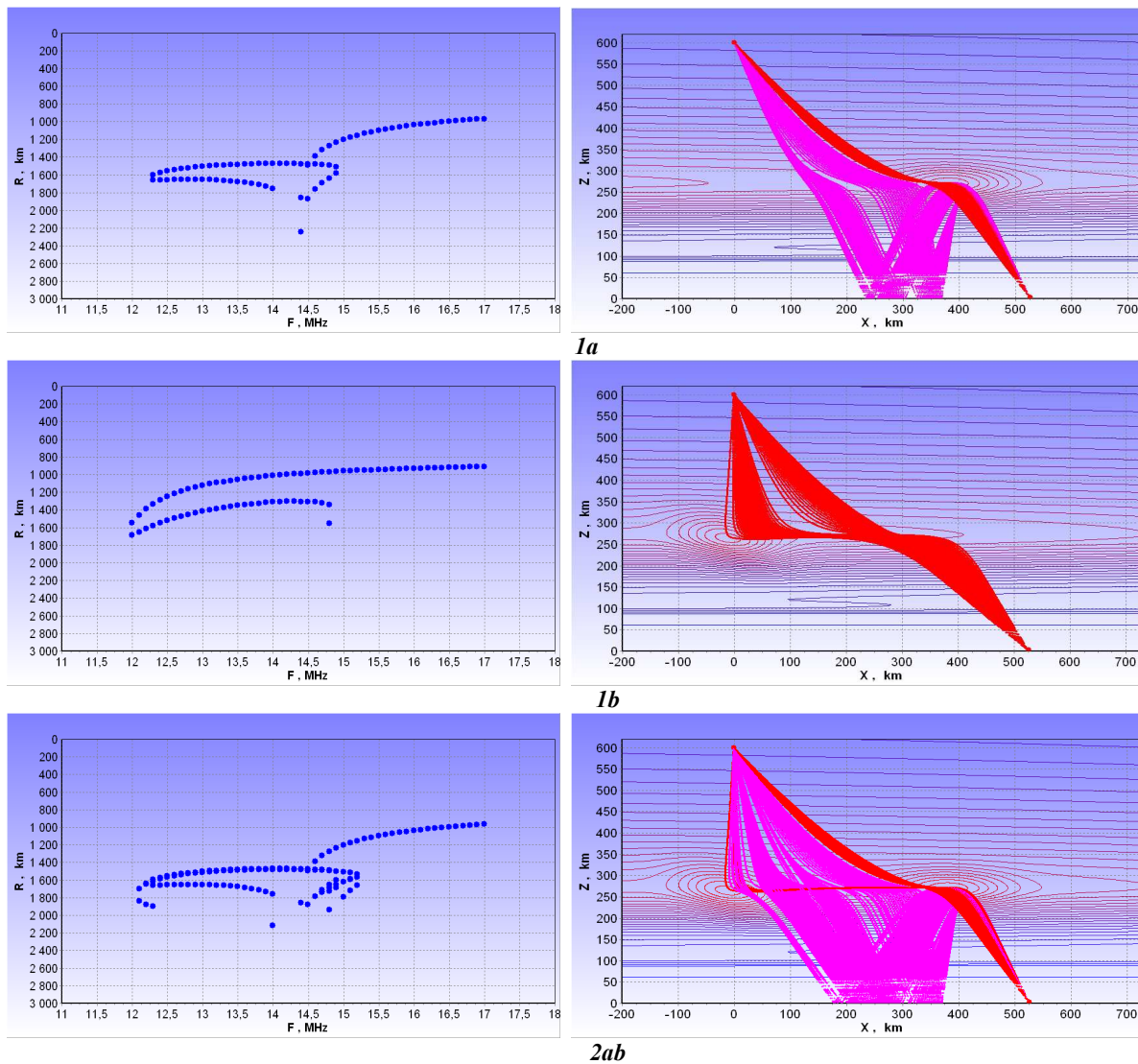


Рис. 6. Ионogramмы и траектории лучей для случаев *1a*, *1b* и *2ab*.

Анализ серии ионogramм, приведенных на рис. 2 показывает, что можно различить последовательные при движении спутника над облаком этапы:

- начала влияния «облака»
- усиления
- максимального воздействия
- ослабление влияния.

В данном случае весь цикл занимает более 1000 км пролета спутника над наземной станцией. На начальном этапе исследования неоднородности в качестве максимального влияния неоднородности можно выбрать случаи, когда частота сквозного прохождения радиоволн между спутником и наземной станцией минимальна. На рис. 2 это третья и шестая ионogramмы.

Из рис. 2 можно сделать еще один важный вывод – неоднородности, присутствующие в ионосфере недалеко от станции наблюдения, оказывают влияние практически на всю серию получаемых трансионogramм при пролете ИСЗ.

На рис.3 представлена аналогичная ситуация, но в качестве неоднородности выбран вариант «ступеньки».

Так же, как и в случае с «облаком», анализ рис. 3 позволяет утверждать, что по форме ионogramм данной серии и структуре полученных данных можно сделать вывод о положении «ступеньки» относительно спутника и станции наблюдения, а также о величине соответствующего горизонтального градиента. Отличия между ионogramмами «облако» и «ступенька» также достаточно характерны для выбора между ними.

2.3. Вариант неоднородностей типа «облако» с двумя объектами

Рассмотрим две неоднородности. Первая (*a*) – чуть правее линии, соединяющей спутник и приемную станцию на Земле, вторая (*b*) – прямо под спутником. Вторая также наклонена на угол 30 градусов. Данный случай проиллюстрирован на рис. 4.

Две неоднородности увеличивают число дополнительных треков на ионограммах. Для понимания динамики перехода от одной неоднородности к двум рассмотрим следующие 4 варианта ионограмм, представленных на одном графике на рис. 5.

Сравнение данных, представленное на рис. 5 показывает, что на высоких частотах совпадают случаи *0* и *1b*, а также *1a* и *2ab*. В области низких частот наблюдаются различные дополнительные следы, которые могут быть использованы для построения пространственного распределения электронной плотности.

На рис. 6 представлены ионограммы и траектории лучей для каждого случая при наличии неоднородности в отдельности.

Из анализа траекторий можно утверждать, что основной вклад в общую ионограмму *2ab* дает неоднородность *1a*, находящаяся ближе к линии «спутник-ПРМ».

ВЫВОДЫ

Проведенная в данной статье, а также в предшествующей статье [1], подготовка к обработке экспериментальных данных планируемого эксперимента по трансionoсферному радиозондированию на ИСЗ «Ионосфера», разумеется, не может предсказать все детали будущего эксперимента. Однако, в случае успеха в проведении самого эксперимента, нацеленного на реализацию ТИЗ и ОТИЗ, его базовые возможности в цитированных работах предварительно рассмотрены и соответствующими выводами будущие исследователи вооружены. Именно:

- Бортовой ионозонд, который планируется к использованию на ионосферных спутниках, должен быть оборудован дополнительным передатчиком на достаточ-

но высокой частоте (например, также как и предшествующие бортовые ионозонды на частоте 137 МГц) для передачи ионограмм внешнего зондирования (ВнЗ) в режиме мгновенной передачи (задержка – несколько секунд) на Землю. Синхронизация бортовой и наземной аппаратуры планируется осуществлять с опорой на Службу мирового времени (через спутники GPS-ГЛОНАСС). Все особенности ТИЗ и ОТИЗ, которые были выявлены в предшествующих экспериментах, учтены при конструировании соответствующей аппаратуры. В частности, ионосферные неоднородности, рассмотренные в настоящей работе размеров и контрастности, а также и отличающиеся от них в известных пределах, не могут не быть зафиксированы и не могут не быть определены в данной технической реализации методов ТИЗ и ОТИЗ;

- трансionoграммы, будучи рассмотрены одновременно с ионограммами ВЗ и ВнЗ, в течение сеанса прохождения ИСЗ над наземным пунктом и переданные на него без задержки, несомненно, принесут дополнительную информацию, которая практически всегда будет существенно улучшать знание пространственной структуры ионосферы, основанное только на данных одного метода (ВЗ или ВнЗ);
- детальный анализ последовательности трансionoграмм и модельный расчет различных возможных вариантов может выделить одну или несколько неоднородностей в зоне ответственности трансionoсферного радиозондирования, определить их местоположение, оценить их размеры, скорости перемещения, а в дальнейшем и детали внутренней структуры.

Благодарность.

Авторы выражают благодарность С.А. Пулинцу, И.И. Иванову, В.П. Дьякову и А.В. Тертышникову за полезные замечания и общее обсуждение проблем и задач по планам реализации ТИЗ и ОТИЗ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Данилкин Н.П., Жбанков Г.А., Журавлев С.В., Котонаева Н.Г. Трансионсферное радиозондирование - метод диагностики наличия ионосферных неоднородностей // Гелиогеофизические исследования: научный

электронный журнал. - 2012. - № 2. [Электронный ресурс]. Доступ с сайта ФГБУ «ИПГ» <http://ipg.geospace.ru/> - URL:<http://www.vestnik.geospace.ru>. (дата обращения: 30.05.2012).

2. Данилкин Н.П. // В кн. «Ионосферно-магнитная служба» / Под ред. Авдюшина

3. С.И., Данилова А.Д.. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. - С. 79-110.
4. Danilkin N.P. // JATP. 1994. V. 56. No 11. P. 1423.
5. Авдюшин С.И., Данилкин Н.П., Иванов И.И. и др. // Геомагнетизм и аэрномия. 1983. - Т.23. - 4. С. 567.
6. Danilkin N.P., Avdushin S.I., Ivanov I.I., Kuschnerovsky Yu.V and Migulin V.V. // Advances in space research. 1988. V.8. No 4. P.29-38.
7. Данилкин Н. П., Котонаева Н. Г.//Геомагнетизм и аэрномия. 2009. – Т.49 – 1. С.74-87.
8. Карпачев А.Т., Жбанков Г.А., Телегин В.А. Земные задержанные следы на ионограммах Интеркосмос - 19, связанные со структурными особенностями ионосферы//Труды междунар. науч. конф. «Излучение и рассеивание электромагнитных волн», ИРЭМВ-2011, Таганрог-Дивноморское. 27 июня – 2 июля 2011 г. – Таганрог: Изд-во Технологического ин-та ЮФУ, 2011г. – С. 404-408.
9. Лукин Д.С., Спиридонов Ю.Г. //В кн. «Лучевое приближение и вопросы распространения радиоволн». – М.: Наука, 1971 . С. 265-279.
10. Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. - М.: Наука, 1980.