

УДК 50.388.2

## **Трансионосферное радиозондирование - метод диагностики наличия ионосферных неоднородностей**

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

Представлено дальнейшее развитие метода трансионосферного радиозондирования ионосферы (ТИЗ) в диапазоне ее плазменных частот. Новизна заключается в том, что в рассмотрение включены траектории радиоволн с отражением от Земли. Проведено моделирование ТИЗ в условиях неоднородной ионосферы при наличии в ней неоднородностей средних размеров с построением возможных траекторий, а также получением и анализом соответствующих трансионограмм.

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

### **Введение**

Метод трансионосферного радиозондирования (ТИЗ), впервые описанный более 30 лет назад [1-4] всегда предполагал выявление, как факта существования ионосферных неоднородностей, так и возможности описания их геометрических характеристик и физических параметров. Однако в опубликованных ранее работах всегда рассматривались только те – исследующие ионосферу – радиолучи, которые распространяются между ИСЗ и наземной станцией без отражения от Земли. Это замечание относится как к случаю прямого трансионосферного радиозондирования, так и к обратному трансионосферному радиозондированию (ОТИЗ). Исключением является, пожалуй, только случай так называемых «двойных трансионограмм» [5, 6], которые впервые показали существование отрицательных «долин» между слоями F1 и F2, и в которых – для объяснения появления второго «транследа» – были привлечены лучи с отражением от Земли. Дальнейшее развитие, однако, показало, что частный случай прямого ТИЗ – зондирование с борта ИСЗ с высот ниже высоты максимума ионосферы – свидетельствует о том, что не менее существенными, чем прямые радиолучи между спутником и наземной

---

Данилкин Николай Петрович, ФГБУ «ИПГ», зав. лаб., т.(499)1813622, e-mail: nickdaniлкиn8@yandex.ru.

Жбанков Геннадий Анатольевич, ЮФУ, г.Ростов-на-Дону, старший научный сотрудник, т.(863)241-90-56, e-mail: zhbankov@ip.rsu.ru.

Журавлев Сергей Владимирович, ФГБУ «ИПГ», зав. отделом, т.(499)1810446, e-mail: szhuravlev-iag@yandex.ru.

Котонаева Надежда Геннадьевна, ФГБУ «ИПГ», ведущий научный сотрудник, т.(499)1813622, e-mail: kongt@yandex.ru.

станцией, также являются исследующие ионосферу радиолучи с отражением от Земли [7]. При этом были получены ионограммы нового вида, в которых след отражения от Земли не является однозначной функцией частоты зондирования, что является обязательным для рутинных ионограмм внешнего зондирования. На рис.1 показан пример такой ионограммы (а), траектории лучей, ее создающих (б) и пример подгонки (крестики) рассчитанных действующих дальностей наклонного следа отражения от Земли реальному эксперименту.

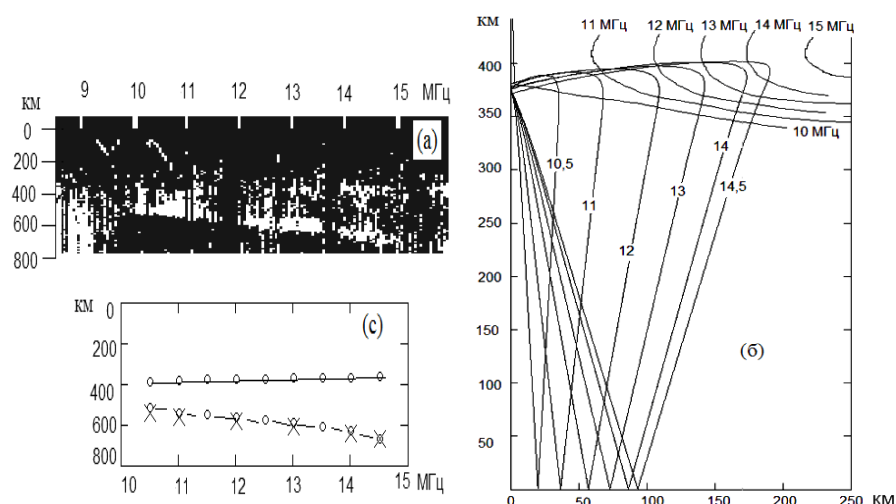


Рис.1. Ионограмма, полученная 5 мая 1999 г. на орбитальном пилотируемом космическом комплексе «Мир» с графическими пояснениями ее обработки.

Новые ионограммы были опубликованы [8] в международном бюллетене первой рабочей группы комиссии «G - Ионосфера и распространение радиоволн» международного научного радиосоюза (URSI). Этот бюллетень распространяется на всех ионосферных станциях планеты, и в нем рекомендовано решением Генеральной Ассамблеи URSI публиковать все случаи появления новых ионограмм для всестороннего обсуждения. Эта публикация вызвала значительный интерес и по рекомендации доктора Вилкинсона (в это время он выполнял обязанности председателя комиссии G) новые ионограммы было рекомендовано называть – ЗНС-ионограммами, а наклонный след отражения от Земли – задержанным нижним следом (ЗНС).

ЗНС является функцией нескольких переменных, определяющих характер зондирующих ионосферу траекторий радиоволн. Пространственная область существования траекторий радиоволн является «ответственной» зоной, в которой можно говорить о расположении плазменных частот ионосферы, т.е. о внутреннем строении ионосферных

неоднородностей. Это позволяет надеяться, что и новые эксперименты по трансionoсферному радиозондированию также дадут сведения об этом.

Настоящая работа и посвящена математическому моделированию нового эксперимента по радиозондированию ионосферы с высот существенно больших высоты ее главного максимума. Проведено моделирование трансionoсферного радиозондирования в условиях неоднородной ионосферы при наличии в ней неоднородностей средних размеров с построением возможных траекторий, а также получением и анализом соответствующих трансionoграмм.

### **Модель ионосферы и метод расчета траекторий радиоволн**

*Методика расчетов.* Решение поставленной задачи возможно на основе траекторных расчетов. Кратко представим методику этих расчетов. Задача 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. В общем случае уравнение граничной задачи можно записать в виде

$$D(f, \Delta_0, \alpha_0) - L = 0, \quad (1)$$

где  $D(f, \Delta_0, \alpha_0)$  — длина дуги, соединяющей проекцию положения спутника на поверхность Земли и конечную точки траектории, как функция угла места волнового вектора  $\Delta_0$  в момент излучения, его азимутального угла  $\alpha_0$  и рабочей частоты  $f$ , т.е. расстояние вдоль поверхности Земли от спутника до точки пересечения траектории с ней.  $L$  определяет расстояние между проекцией спутника и приемной станцией. Кроме того, необходимо учесть, что нас интересуют также лучи, претерпевшие во время распространения переотражение от Земли. Однако не существует методов поиска всех корней уравнения с несколькими переменными, особенно в случае близко расположенных корней. Поэтому при моделировании были использованы некоторые упрощения.

Первое основано на том, что рассматриваемый процесс относится к типу наклонного распространения радиоволн. В этом случае у нас имеется выделенная плоскость, проходящая через спутник, точку приема и центр Земли. В горизонтально-стратифицированной ионосфере все лучи располагались бы в ней. Однако и в случае горизонтально-неоднородной среды при наклонном распространении степень отклонения искомым траекторий от нее незначительна. Поэтому можно перейти к двумерному варианту задачи, положив значение азимутального угла  $\alpha_0$  равным азимуту нашей выбранной плоскости.

Второе упрощение связано с тем, что при наклонном распространении прямой учет магнитоактивности среды можно с хорошей точностью заменить частотными поправками к изотропному варианту. А так как нас интересуют скорее качественные особенности влияния

неоднородности на трансionoграммы, то можно ограничиться изотропным приближением.

Поскольку ионосфера представляет собой неоднородную среду, нахождение траектории в ней аналитическими способами невозможно. Наиболее последовательно и эффективно в рамках геометрооптического приближения задача нахождения траекторных и энергетических характеристик радиоволн КВ диапазона реализуется на основе метода характеристик [9, 10]. Он основан на численном решении локального дисперсионного уравнения

$$F(t, \mathbf{r}, \mathbf{k}, \omega) = \kappa^2 - \kappa_0^2 \cdot n^2(t, \omega, \mathbf{r}, \mathbf{k}, \mathbf{H}), \quad (2)$$

путем приведения его к системе дифференциальных характеристических уравнений относительно пространственных и лучевых координат. Система характеристических уравнений для нахождения траекторий в канонической форме может быть записана следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{r}}{d\tau} = \frac{\partial F}{\partial \mathbf{p}} = \mathbf{p} - \frac{1}{2} \frac{\partial n^2}{\partial \mathbf{p}}, \\ \frac{d\mathbf{p}}{d\tau} = -\frac{\partial F}{\partial \mathbf{r}} = \frac{1}{2} \frac{\partial n^2}{\partial \mathbf{r}}, \end{cases} \quad (3)$$

где  $n(t, \omega, \mathbf{r}, \mathbf{k}, \mathbf{H}) = \mu + i\chi$  – комплексный показатель преломления Эпплтона,  $\mathbf{H}$  – вектор внешнего геомагнитного поля,  $\mathbf{r} = \{r, \theta, \varphi\}$  – радиус-вектор в сферической системе координат,  $\mathbf{p} = \frac{\mathbf{k}}{|\mathbf{k}_0|} = \{p_i\}$  – нормированный волновой

вектор,  $\tau$  – независимая вспомогательная переменная. Поскольку учет столкновения в ионосферной плазме слабо влияет на траекторию луча, можно заменить  $n$  его действительной частью  $\mu$ .

Решения уравнения (1) для заданной частоты находим в два этапа. Сначала определяются интервалы угла места  $\Delta_0$ , на которых функция меняет знак, что означает наличие решения в его пределах. На втором этапе для каждого такого интервала методом дихотомии находится точное решение.

*Модель ионосферы.* Таким образом, при расчетах используется двумерно-неоднородная модель распределения электронной концентрации в ионосфере. Распределение  $Ne$  вдоль плоскости задается в виде суммы базовая, невозмущенной части и дополнительного возмущения  $Ne = No(I + \delta)$ , где  $No$  – базовая часть. Для ее построения по международной модели IRI находим электронную концентрацию в узлах заданной на плоскости решетки в интересующий нас момент времени. В дальнейшем значения концентрации в произвольной точке находим, используя для

интерполяции кубические сплайны, которые удовлетворяют требованиям непрерывности функции и ее производной.

Возмущенная часть электронной концентрации задается в виде эллипсоида:

$$\delta = dN \cdot \exp \left\{ - \left( \frac{x - x_0}{Lx} \right)^2 - \left( \frac{z - z_0}{Lz} \right)^2 \right\} \quad (4)$$

с центром в точке  $(x_0, z_0)$  и масштабами  $(Lx, Ly)$ .

### Результаты моделирования

Инструментом, определяющим и измеряющим ионосферные неоднородности (далее будем условно называть их «облака»), является сканирование трансionoсферным лучом на границе диапазона радиопрозрачности ионосферы по пространству, которое определяется двумя граничными лучами, как показано на рис.2.

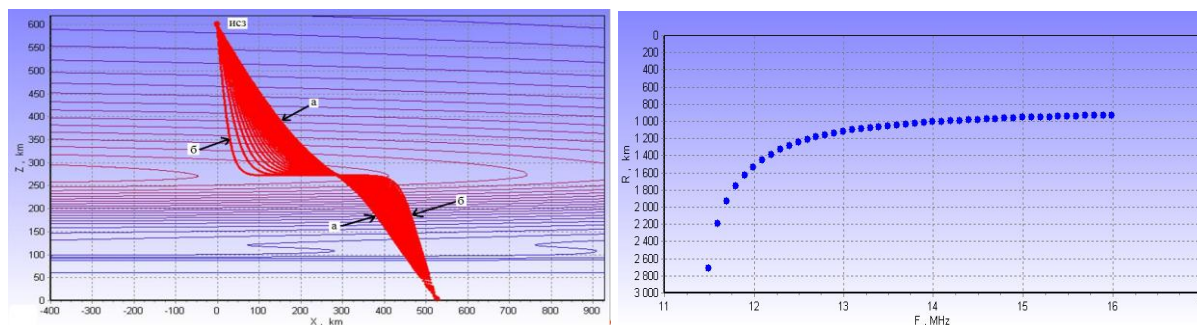


Рис.2. Иллюстрация области пространства (слева), которая благодаря сканированию лучей радиоволн на разных частотах, будет под контролем метода трансionoсферного радиозондирования в случае отсутствия в названном пространстве горизонтальных градиентов заметных масштабов. Справа соответствующая трансionoграмма.

На рис.2 луч «а» на более высокой частоте распространяется по траектории близкой к прямой линии между ИСЗ и наземной станцией. Луч «б», который является лучом с наименьшей частотой, проникающим сквозь ионосферу при данных условиях, имеет частоту слегка выше критической частоты в точке прохождения сквозь максимум. Таким образом, под контролем находятся области пространства между этими крайними лучами. Соответствующая трансionoграмма имеет простой вид и приведена на рис.2 справа. Такие ионограммы неоднократно наблюдалась в экспериментах с «ИК-19» и «КОСМОС-1809» [1-4].

Внесение облака внутрь пространства, находящегося под контролем, изменяет как траектории радиоволн, так и саму область контролируемого пространства. Рис.3 иллюстрирует это положение. Рисунок справа – соответствующая ионограмма.

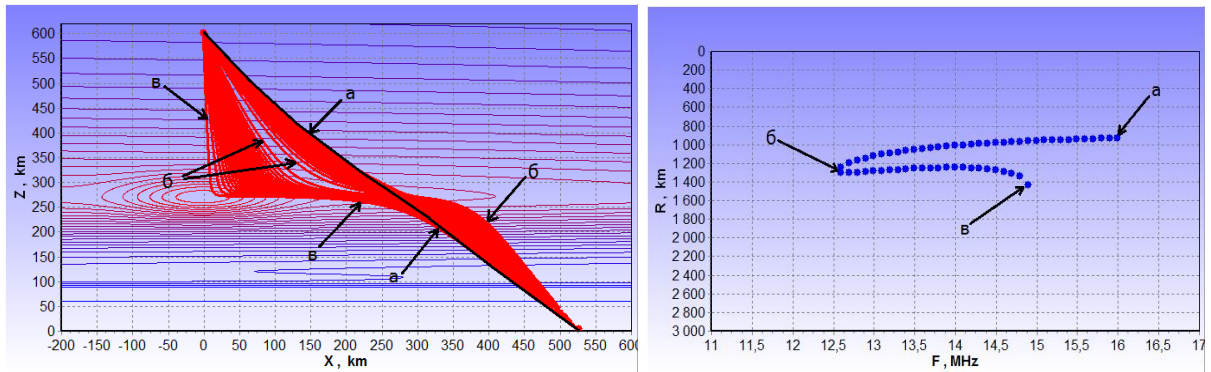


Рис.3. Неоднородность типа «облако» находится строго под спутником. Слева показаны траектории радиоволн. Справа соответствующая ионограмма. Буквы иллюстрируют соответствие траекторий и следов на ионограмме.

Хорошо видно, что даже без отражения от Земли на ионограмме появляется второй след, который сильно напоминает след ЗНС на рис.1. Эти два следа на рис.3 также напоминают наклонные ионограммы, на которых зарегистрирован луч Педерсена. Физический смысл этих лучей также вполне понятен. Это есть увеличение действующего расстояния в области, где показатель преломления близок к нулю. Просматривается аналогия с лучом Педерсена в ионограммах наземного наклонного радиозондирования.

В связи с тем, что ИСЗ движется много быстрее ионосферных облаков, будем рассматривать ситуацию, когда спутник перемещается относительно неподвижного облака. На рис.3 облако находится строго под ИСЗ. Теперь начнем перемещать его в той же плоскости и рассмотрим происшедшие изменения. По мере удаления облака от гравитационной вертикали будет увеличиваться роль отражений от Земли. На рис.4 представлены траектории радиоволн при удалении спутника приблизительно на 400 км от предыдущего положения.

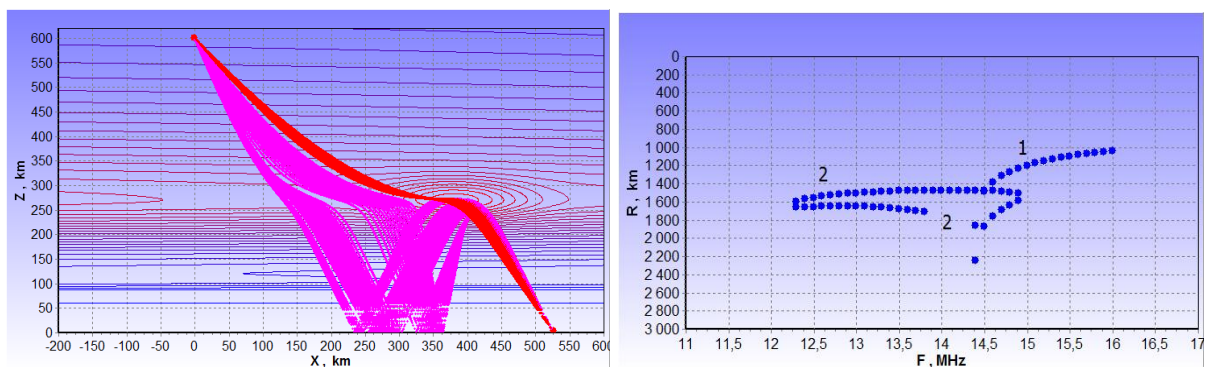
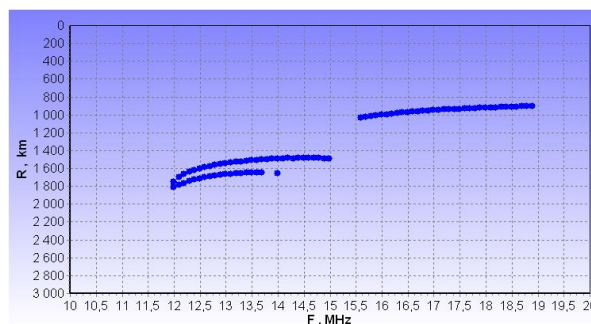
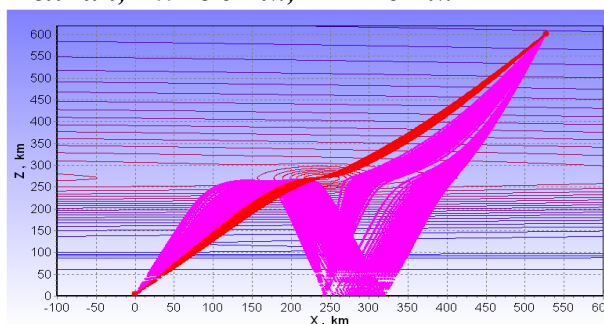


Рис.4. Траектории радиоволн и соответствующая ионограмма при наличии одного облака и для расположения спутника под углом видимости около 45 градусов. Цветом выделены траектории без отражения от Земли (красный) и с одним отражением от Земли (розовый).

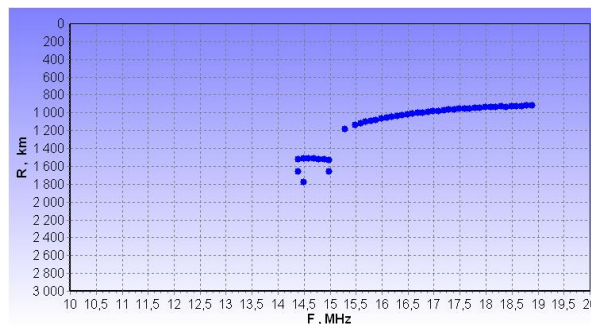
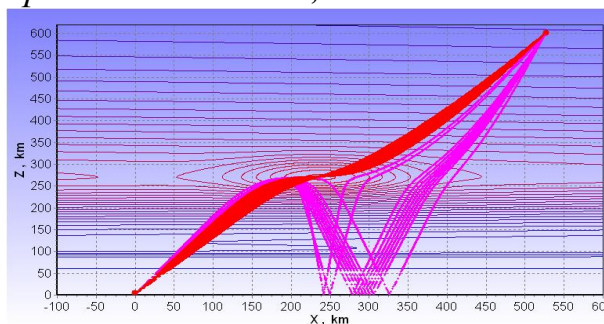
На рис.4 хорошо видно, что отражение от Земли добавляет несколько дополнительных треков на ионограмму. Отраженные от Земли лучи выделены другим цветом и образуют совокупность треков 2. При этом подконтрольная область значительно разрастается. Проведенное рассмотрение показывает, что трансionoграммы для различных положений облака относительно спутника будут значительно отличаться одна от другой. Можно указать основные причины ожидаемых отличий в трансionoграммах: удаленность по горизонтали от гравитационной вертикали ИСЗ, контрастность облака и его размеры. Мы сознательно не указываем здесь высоту расположения облака, так как предполагаем, что центр облака всегда находится на высоте максимума ее концентрации.

Зависимость трансionoграммы от контрастности облака и его размеров иллюстрируется на рис.5.

*Мелкая,  $L_x=50$  км,  $L_z=20$  км*



*Средняя  $L_x=100$  км,  $L_z=40$  км*



*Большая  $L_x=170$  км,  $L_z=70$  км*

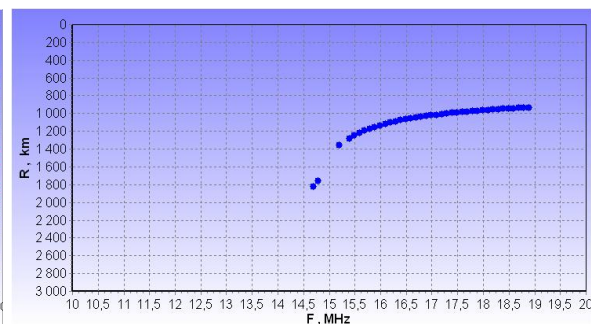
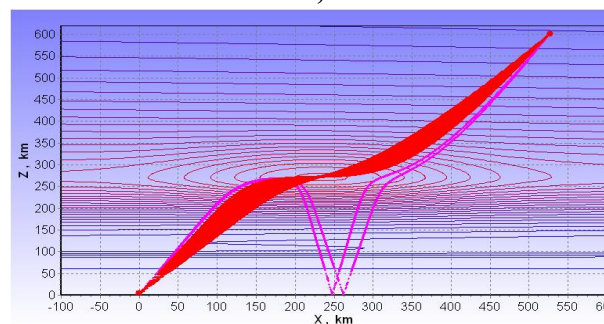


Рис. 5. Представлены траектории радиоволн, которые возникают при трех различных размерах неоднородности (левые три вставки). Справа представлены соответствующие трансionoграммы.

Из этого рисунка хорошо видно, что более мелкие облака создают более сложные ионограммы, и с ростом величины облака число отраженных от Земли лучей сокращается. Добавим, что учет двукратного переотражения от Земли еще более усложняет ионограммы и уменьшает их минимальную частоту.

### **Заключение.**

1. 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. Это относится как к неоднородностям, которые расположены выше максимума ионосферы, так и к тем, которые расположены ниже максимума. Таким образом, любые дополнительные трэки на трансionoграммах являются свидетельством наличия неоднородностей в зоне, контролируемой трансionoсферным зондированием. Следовательно, метод трансionoсферного радиозондирования – как минимум – является реальным методом диагностики наличия и местоположения ионосферной неоднородности.
2. Можно ожидать, что метод построения траекторий сигналов в методе ТИЗ и сравнение результатов с экспериментально полученными трансionoграммами даст возможность не только диагностировать факт наличия неоднородности и ее местоположения, но и впоследствии позволит решать задачи изучения внутреннего строения ионосферных неоднородностей по аналогии с методом ЗНС.

### **Литература:**

1. Данилкин Н.П. Трансионoсферное радиозондирование как средство контроля состояния ионосферы // В кн. «Ионосферно-магнитная служба» / Под ред. Авдюшина С.И., А.Д. Данилова, Ленинград, Гидрометеoиздат, 1987, С. 79-110.
2. Danilkin N.P. Transionospheric radiosounding // JATP, 1994, V.56, №11, p.1423
3. Авдюшин С. И., Данилкин Н. П., Иванов И. И. и др. Трансионoсферное зондирование на границе радиопрозрачности ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. 1983. Т.23. №4. с.567.
4. Danilkin N.P., Avdushin S.I., Ivanov I.I., Kusshnerevsky Yu.V and Migulin V.V.. Transionospheric sounding as a final link in the



- information system // *Advances in space research*, 1988. V.8. №4. p.29-38.
5. Данилкин Н.П., Иванов И.И., Ковалев С.В., Кушнеревский Ю.В. Двойные трансionoграммы // *Геомагнетизм и аэрономия*. 1986. Т.26. №6. с.1011.
  6. Данилкин Н. П. , И. И. Иванов, Е. Б. Ипатов, В. И. Чивилев; «Природа возникновения двойных трансionoграмм» // *Геомагнетизм и аэрономия*, 1996, Т.36, №2, с.96-103.
  7. Данилкин Н.П., Н.Г. Котонаева; «Интерпретация и обработка ионограмм радиозондирования со сверхнизких орбит» // *Геомагнетизм и аэрономия*, 2008, Т.48, №6
  8. Danilkin N.P. New ionograms observed by satellite radio sounding from below of the F-layer maximum // *Buletin INAG*. [www.ips.gov.au/IPSHosted/INAG/web-inag/index.html](http://www.ips.gov.au/IPSHosted/INAG/web-inag/index.html). 2003.
  9. Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука. 304 с. 1980.
  10. Лукин Д.С., Спиридонов Ю.Г., Применение метода характеристик для решения на ЭВМ задач распространения электромагнитных волн в неоднородных анизотропных средах // В кн. «Лучевое приближение и вопросы распространения радиоволн», 1971, Изд-во «Наука», с.265-279.