

Аномальное поведение критической частоты ионосферы

В.М. Смирнов, Е.В. Смирнова

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино, ysmirnov@ire.rssi.ru

Представлены результаты работы аппаратно-программного комплекса, предназначенного для мониторинга ионосферы Земли по данным навигационных спутниковых систем. Обнаружено аномальное поведение критической частоты F2-слоя ионосферы на широтах 57-59 градусов, наблюдаемое в декабре 2014 года.

The results of a hardware-software complex intended for monitoring the Earth's ionosphere according to navigation satellite systems are presented. The anomalous behavior of the critical frequency of the F2-layer ionosphere at latitudes 57-59 degrees observed in December 2014 are detected.

Введение

Ионосфера как среда, содержащая наибольшее количество электронов и ионов в атмосфере занимает ключевое место как в протекании физических и химических процессов в околоземной плазме, так и в диагностических возможностях для наблюдения процессов, которые происходят в земной атмосфере и в околоземном космическом пространстве. Наблюдения за состоянием ионосферы ведутся на всей территории Земли с использованием различных станций наблюдения.

В настоящее время существует много методов контроля состояния ионосферы. Среди них центральное место занимает метод вертикального радиозондирования ионосферы. Он дает наиболее полную и легко интерпретируемую информацию о состоянии ниже максимума электронной концентрации ионосферы. Основным преимуществом метода вертикального радиозондирования является возможность получения профиля электронной концентрации до высоты максимума F2-слоя ионосферы. Причина, по которой вертикальное радиозондирование занимает ключевое место в ионосферных измерениях, являясь беспрецедентным по точности, проста - информацию приносит резонансное взаимодействие радиоволн с ионосферной плазмой. Резонанс же является едва ли не сильнейшим инструментом физики вообще.

Недостатком метода вертикального радиозондирования является его локальность.

Самым распространенным в мире средством вертикального радиозондирования является дигизонд: "DigisondeTM Portable Sounder" (DPS-4). Цифровой ионозонд DPS-4 выпускается Лоуэлловским центром атмосферных исследований Массачусетского университета США. Несколько таких ионозондов расположено на территории России, один из них находится в г. Троицк Московской области.

Ионосфера испытывает очень сложные пространственно-временные вариации, связанные с изменениями геомагнитного поля, влиянием солнечной активности, электрических полей. Определяющее влияние на характеристики ионосферы оказывает солнечное излучение, состоящее из электромагнитной и корпускулярной составляющих. Электромагнитная составляющая включает в себя ультрафиолетовое и рентгеновское излучение. Каждая из частей солнечного излучения воздействует на различные области атмосферы Земли и приводит к их ионизации. Механизмы образования ионосферы на разных высотах оказываются различными, и такой важный параметр, как электронная концентрация, может изменяться независимо в разных областях ионосферы. Существуют также неоднородности ионосферы, которые, по-видимому, только косвенно связаны с Солнцем. К ним относятся градиенты

концентрации, изменения высоты слоя, перемещающиеся ионосферные возмущения, *F*-рассеяние и спорадический *E*-слой. Эти неоднородности трудно, а в большинстве случаев и невозможно предсказать. Аномалии в распределении электронной концентрации могут возникать в результате турбулентных движений и из-за различных плазменных неустойчивостей.

Метод радиопросвечивания и область наблюдения

Одна из основных задач исследования ионосферы – ионосферного зондирования – определение вертикального профиля электронной концентрации. Эта характеристика в значительной мере определяет показатель преломления ионосферы для радиоволн и, соответственно, особенности распространения этих волн.

В последнее время большое распространение получило радиозондирование ионосферы с использованием сигналов навигационных ИСЗ типа GPS и ГЛОНАСС. Практическая реализация ионосферного зондирования является достаточно сложной задачей и основана на решении обратных задач математической физики. Методология исследований, базирующаяся на решении обратных задач, является одним из новых направлений в изучении процессов, происходящих в ионосфере Земли [1-3]. Преимущество методов, использующих теорию решения обратных задач распространения радиоволн в неоднородной атмосфере, заключается в том, что они позволяют проводить экспериментальные исследования непосредственно при эксплуатации существующих спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS, предназначенных для решения других задач.

Глобальные спутниковые радионавигационные системы GPS и ГЛОНАСС дают уникальную возможность получения высотного профиля распределения электронной концентрации ионосферы Земли в подорбитальном пространстве космического аппарата для различных гелио- и геофизических условий в любое время суток и любой точке земной поверхности, включая океаны и моря, северный и южный полюса. На рис.1 представлены траектории подионосферных точек, полученные в течении суток с использованием одного наземного приемника навигационных сигналов. Приемник расположен в Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН в городе Фрязино Московской области (координаты приемника -55.76° с.ш., 37.94° в.д.). На рисунке положение приемника обозначено треугольником. В течение суток с одного наземного приемника можно получить информацию о распределении электронной концентрации более чем в 36000 подионосферных точках. В отличие от ионозондов вертикального зондирования метод радиопросвечивания позволяет получать информацию об ионосфере на площади более 3-х млн. квадратных километров.

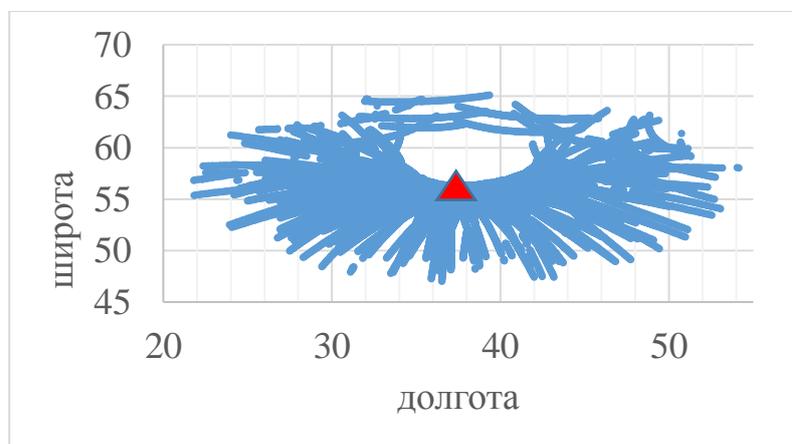


Рис.1. Траектории подионосферных точек в суточном сеансе измерений.

В отличие от метода вертикального зондирования, основанного на регистрации отражения радиоволн от определенных областей ионосферы, метод радиозондирования по трассе спутник-Земля (метод радиопросвечивания) базируется на измерении параметров проходящих через неё радиоволн. Метод радиопросвечивания дает возможность определять распределение электронной концентрации вдоль всей траектории подионосферной точки с дискретностью до 30 секунд. Такая детализация измерений позволяет детектировать как естественные, так и искусственные образования в ионосфере. Подробное описание и технология его реализации изложены в работах [3-].

Результаты измерений

Мониторинг состояния ионосферы осуществлялся с помощью аппаратно-программного комплекса, расположенного в ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. Основные технические характеристики комплекса и его возможности достаточно подробно изложены в работах [4, 5]. Общий вид комплекса представлен на рис. 2.



Рис. 2. Общий вид аппаратно-программного комплекса.

Здесь представлены некоторые результаты, полученные в декабре 2014 года, для нескольких спутников ГЛОНАСС и GPS. На рис. 3 представлен пространственно-временной ход значения электронной концентрации в максимуме F2-слоя ионосферы, полученный по наблюдениям спутника GPS №2. Указанный спутник наблюдался в течении нескольких часов. Трассы подионосферных точек представлены на рис.4. На рис. 3 представлен детальный ход критической частоты в широтном диапазоне 57-59°, полученный по наблюдениям спутника №2 в утреннее и вечернее время суток. На графиках хорошо видно значимое уменьшение значения критической частоты в указанном диапазоне широт и наличие локального максимума (указано стрелкой). Максимальное значение в области понижения соответствует примерно одной и той же широте. Эта область наблюдалась как утром, так и вечером. Координаты подионосферной точки с локальным максимумом значения критической частоты соответствуют 45.03° в.д. и 57.83° с.ш. для времени наблюдения 3.98 часа и 28.39° в.д. и 57.51° с.ш. для времени наблюдения 16.45 часа. На рис. 4 эти точки отмечены стрелкой. Как видно, эти точки наблюдались при разных азимутальных направлениях относительно расположения приемника (показан на рис. 4 ромбиком).

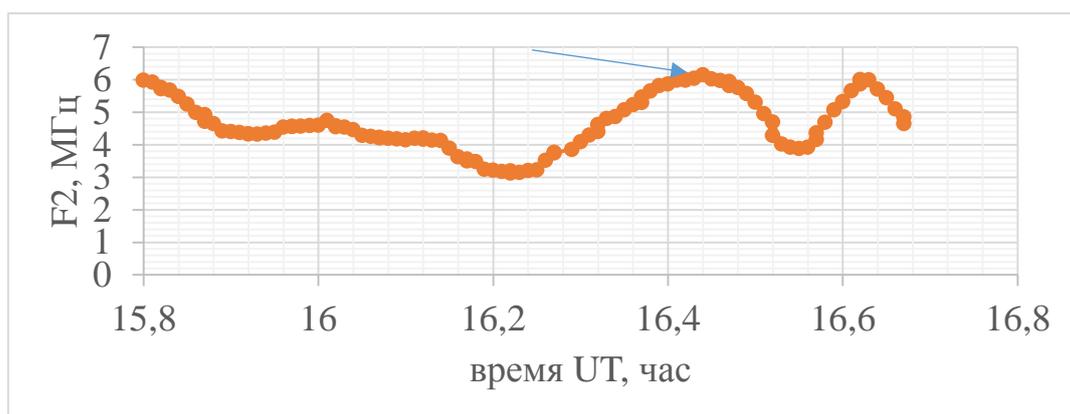
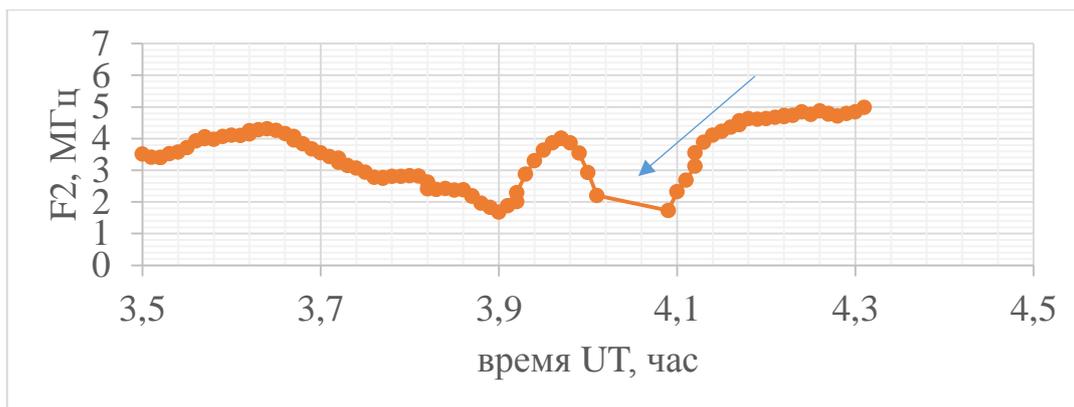


Рис.3. Изменение критической частоты F2-слоя ионосферы вдоль траектории подионосферной точки.

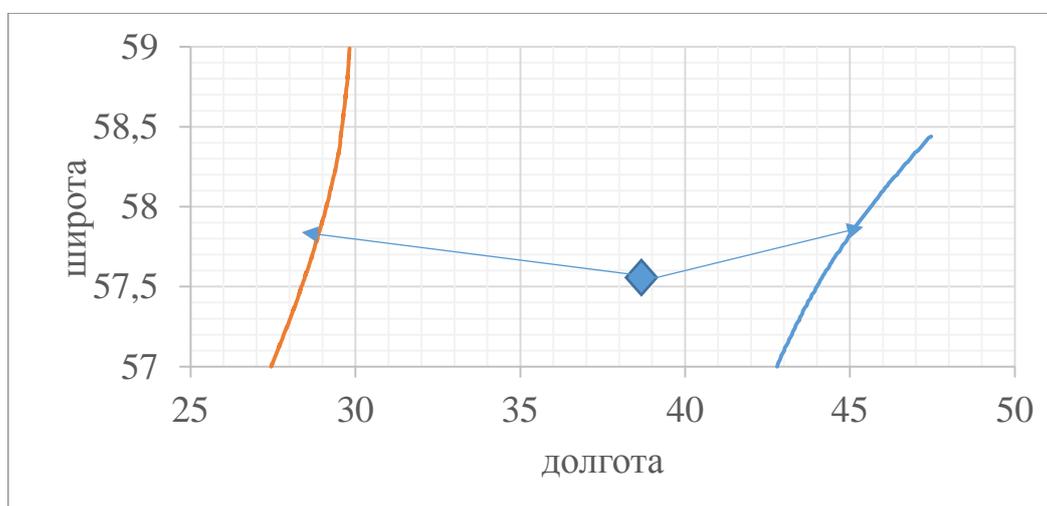


Рис. 4. Траектории подионосферной точки в период с 15 до 17 часов (слева) и с 3,5 до 4,5 часов (справа).

Следует заметить, что для диапазона широт $57-59^{\circ}$ такой ход изменения критической частоты аналогичен и для других сеансов наблюдений, проведенных в течение суток. При этом широта подионосферной точки с локальным максимумом критической частоты находится в пределах $57-59^{\circ}$, в то время как долгота этой точки изменяется от 25 до 55° в зависимости от времени наблюдения. Диапазон долгот ограничен областью действия аппаратно-программного комплекса. Можно

предположить, что на этих широтах существует какая-то естественная аномалия в распределении электронной концентрации.

Работа выполнена при частичной поддержке программы Президиума РАН №28 «Космос, исследования фундаментальных процессов и их взаимосвязей».

Литература

1. Смирнов В.М. Решение обратной задачи радиопросвечивания ионосферы Земли градиентными методами //Радиотехника и электроника. 2001. Т.46. №1. С.47-52.
2. Андрианов В.А., Смирнов В.М. Определение высотного профиля электронной концентрации ионосферы Земли по двухчастотным измерениям радиосигналов искусственных спутников Земли //Радиотехника и электроника. 1993. Т.38. №7. С.1326.
3. Смирнов В. М., Смирнова Е. В. Метод радиопросвечивания ионосферы Земли и его практическая реализация. Сборник трудов VII Всероссийские Армандовские чтения, 27-30 июня 2017 г., Муром, МиВЛГУ. С. 129-139.
4. Смирнов В. М., Смирнова Е. В. Модуль ионосферного обеспечения на базе спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС. Журнал Радиоэлектроники. – 2010. -№6 <http://jre.cplire.ru/jre/jun10/3/text.pdf>.
5. Смирнова Е.В., Смирнов В.М., Скобелкин В.Н., Тынянкин С.И., Мальковский А.П., Аппаратно-программный комплекс для мониторинга состояния ионосферы в режиме реального времени // Гелиогеофизические исследования. 2013. В.4. С.32–38.