

## **Применение быстродействующего ионозонда для исследований вариаций электронной концентрации в ионосфере**

А.В. Браницкий, В.Ю. Ким, В.П. Полиматиди

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт Земного Магнетизма, Ионосферы и Распространения Радиоволн им Н.В. Пушкова Российской академии наук, 142190, г. Москва, г. Троицк / e-mail: [ykim@izmiran.ru](mailto:ykim@izmiran.ru), [vppolima@izmiran.ru](mailto:vppolima@izmiran.ru)*

*Описана новая методика измерения быстрых вариаций электронной плотности ионосферы, основанная на быстром измерении ионограмм вертикального зондирования ионосферы. В новой методике время регистрации сокращается за счет применения широкополосных импульсных сигналов, спектр которых может охватывает диапазон зондирующих частот.*

*Described a new method of measuring fast variations of the electron density of the ionosphere, based on a quick measurement of the ionograms of vertical sounding of the ionosphere. In the new method the time of registration is reduced through the use of broadband pulsed signals, which can cover the entire range of probe frequencies.*

### **Введение**

Ионограммы являются основным источником информации об ионосфере и её динамике. Постоянно функционирует и развивается мировая сеть ионосферных станций, унифицируются методы обработки и интерпретации массивов экспериментальных ионограмм. Описание развития техники и методик наземных и спутниковых ионозондов дано в специальном выпуске Трудов ИПГ [1]. Ионозонды решают задачу диагностики ионосферных неоднородностей с характерными временами развития выше 1-10 мин.

В ионосфере происходят более быстрые изменения ионосферной плазмы, например, в начальной фазе воздействия солнечной вспышки, в моменты вторжения потоков заряженных частиц в ионосферу, при различных видах искусственного воздействия на ионосферу, в том числе при воздействии мощными КВ радиоволнами. В случае, когда примерная локализации по высоте происходящих в ионосфере быстрых процессов известна, эти процессы экспериментально исследовались с помощью зондирования ионосферы импульсами на  $n$  фиксированных когерентных частотах ( $n = 4 - 16$ ), области отражения которых были в разных слоях ионосферы и в разных характерных точках (например, верхний и нижний гибридный резонанс при нагреве мощными радиоволнами). На 8 пробных частотах [2] измерялись доплеровские спектры отраженных сигналов на каждой из этих частот, одновременно производились высокоточные фазовые измерения действующей высоты (с точностями  $\sim 300$  м). В работе описаны результаты экспериментов по активному воздействию на ионосферу в Норвегии (Тромсё), когда были исследованы области резонансного воздействия искусственного воздействия на ионосферу мощными радиоволнами. Высокая точность измерения действующих высот пробных волн вместе с размещением областей их отражения в резонансной области мощной волны в ионосфере позволила, решив обратную задачу зондирования, измерить искусственное возмущение электронной плотности ионосферы с характерным временем развития порядка 1 сек.

**Цель работы** - исследование быстрых вариаций высотного профиля электронной концентрации в ионосфере с помощью быстродействующего ионозонда.

### Метод быстрой регистрации ионограмм

Ближайший к поверхности Земли ионосферный  $E_s$  - слой расположен на высоте  $\sim 105$  км. При ВЗ этот слой дает задержку отраженного сигнала  $\sim 700$  мкс. Этот факт используется в современных ионозондах [1,2], когда для увеличения энергетического потенциала радиолокации применяют сложно манипулированные сигналы, например, ФКМ сигналы с длительностью  $\sim 600$  мкс и полосой излучаемого сигнала порядка 100 кГц. При этом зондирующие ФКМ радиосигналы на фиксированной частоте состоят из  $K$  совмещенных по времени элементарных посылок длительностью  $\Delta\tau \sim 50$  мкс каждый с манипуляцией начальной фазой от импульса к импульсу. Длительность такого зондирующего сигнала  $T_c = K\Delta\tau$  меньше 700 мкс. При этом для частоты повторения импульсов зондирования  $F_n = 50$  Гц минимальное время регистрации ионограммы из 400 частот зондирования составляет 8 секунд. Метод быстрого зондирования ионосферы описан в работе [3].

### Экспериментальная аппаратура быстрого ионозонда

Для аппаратной реализации метода быстрого измерения ионограмм была создана экспериментальная установка с использованием ионозонда «Базис-М» и другой промышленной аппаратуры. В качестве излучателя использован передатчик ионосферного комплекса «Базис-М», который позволяет излучать широкополосные сигналы мощностью не менее 10 кВт при длительности импульса до 800 мкс. В качестве задающего генератора в передатчике использовалось созданное в ИЗМИРАН устройство прямого цифрового синтеза сигналов, программно формирующее 4-элементные сигналы ДЧС. Использовались отдельные передающая и приемная штатные антенны комплекса «Базис-3» типа модифицированный наклонный луч для передачи, для приема – антенна ВЗ типа «Дельта».

Для приема сигналов излучаемых ДЧС на базе 4-х РПУ «Катран» была создана 4-х канальная приемно-регистрирующая система, позволяющая осуществить в каждом такте зондирования одновременную цифровую регистрацию на 4-х зондирующих частотах. Экспериментальная установка для работы с ДЧС сигналами была описана в докладе на конференции [3].

### Обработка ионограмм

Точность отсчета характеристик при обработке ионограмм обобщена в Руководстве URSI по интерпретации и обработке ионограмм. При этом рекомендуется определение ионосферных характеристики высоты  $\Delta h'$  проводить по крайней мере с точностями для порядка 2 км для слоя  $E$  и  $E_s$ , и 5 км для слоя.

«Быстрые» ионограммы на каждой отдельной частоте зондирования являются обычной оцифрованной разверткой дальности ионозонда с импульсным зондирующим сигналом амплитудной модуляции.

По вопросу точности измерения задержки каждого отраженного импульса ионограммы на фоне помех можно обратиться к монографиям [4]. В случае слабых шумов (помех)  $\mu \gg 1$  ( $\mu$  – отношение сигнал/шум) для оценки  $\Delta t$  ошибки определения момента прихода сигнала применимо выражение:  $\Delta t = (2\pi \delta f \sqrt{\mu})^{-1}$ . Или переходя к отчету ошибки действующей высоты ионосферы  $\Delta h'$ :  $\Delta h' = c (4\pi \delta_c f \sqrt{\mu})^{-1}$ . Где  $\delta f$  – частотная полоса, занимаемая спектром сигнала. В работе [6] для малого уровня шумов рассчитаны ошибки определения момента прихода сигнала для разных видов огибающей сигнала: треугольная, трапециевидная, колоколообразная. При длительности фронта зондирующего импульса 10 мкс, полосе приемного устройства 10 – 15 кГц и соотношении сигнал/шум  $\mu = 6 - 8$ , потенциальная точность определения высотной координаты  $\Delta h'$  составит  $\approx 0,4$  км.

Практика обработки цифровых ионограмм на станции «Сойка» описана в работе [5]. В работе исследовано влияние отдельных алгоритмов обработки сигналов на качество цифровых ионограмм в борьбе с шумами и помехами:

- накопление, когда суммируются данные по отражениям на фиксированных дальностях, а прием ведется в течение нескольких тактов зондирования;
- пороговое обнаружение, когда регистрируются данные превышающие установленный порог, связанный с уровнем помех на данной частоте зондирования;
- селекция по длительности, когда не регистрируются данные отраженных импульсов, превышающих некую установленную длительность, связанную с длительностью излучаемого импульса.

При этом было показано, что применение в комплексе указанных трех алгоритмов позволяет получить цифровую ионограмму высокого качества.

В упомянутом выше комплексе «быстрого» цифрового» ионозонда время получения ионограммы на всех 256 частотах составляет ~2,2 сек при тактовой частоте зондирования  $F_n \sim 33$  Гц. Через ~ 2,2 сек снятие ионограммы может быть повторено.

Задачей данной работы было получить частую серию быстрых цифровых ионограмм  $h'(f_0)$  и также восстановить соответствующие высотные профили плазменной частоты  $h(f_0)$ . При восстановлении истинного профиля  $h(f_0)$  большую роль играют погрешности экспериментальных данных. Аналогичная задача решалась в работах [1]. При этом исходили из точности экспериментальных данных  $\delta h' = 1,5$  км.

При решении обратной задачи восстановления профиля плазменной частоты  $h(f_0)$  из измеренной ионограммы  $h'(f_0)$  необходимо уменьшить влияние погрешностей измерения, что важно для корректного восстановления  $h(f_0)$ . В процессе анализа экспериментальных данных каждая ионограмма  $h'(f_0)$  подвергалась как автоматической обработке методам обработки цифровых ионограмм [5] так и дополнительному графическому редактированию оператором. Цель последней операции – выделение по времени отражений волны «обыкновенной» поляризации и создание двумерных массивов оцифрованных данных  $\{f_i, h_i'\}$  ( $f_i$  – частота зондирования,  $h_i'$  – измеренная действующая высота отражения). С помощью специального алгоритма на каждом следе ионограммы автоматически проводилась амплитудная селекция отраженных сигналов для поиска максимума огибающей импульса по уровню 0,9. При этом получался массив  $\{f_i, h_i'\}$ , который далее редактировался оператором вручную с помощью графического интерфейса с удалением частот с помехами и удалением по времени отражений «необыкновенной» компоненты.

### **Методика восстановления вертикальных профилей истинной высоты отражения.**

Как известно [6], время групповой задержки зондирующего сигнала при вертикальном зондировании ионосферы определяется как

$$\Delta t_{gp} = \int_0^{z_0} \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial \omega} \omega n_{1,2}(\omega, z) dz, \quad (1)$$

где  $n_{1,2}(\omega, z)$  - показатель преломления «обыкновенной» (1) и «необыкновенной» (2) магнитоионных компонент зондирующей радиоволны,  $z_0$  - высота отражения волны. Уравнение (1) можно преобразовать в интегральное уравнение для определения высотного профиля плазменной частоты  $z(f_0)$  по данным о действующей высоте  $h'(f)$ , получаемой из ионограммы. В дальнейшем для определенности будем рассматривать только волну «обыкновенной» поляризации. Тогда обратная задача

восстановление профиля  $z(f_0)$  из ионограмм вертикального зондирования сводится к решению интегрального уравнения вида

$$\int_{f_1}^f \frac{\partial}{\partial f} f m_1(f, \eta) u(\eta) d\eta = h'(f) - z_0, \quad (1)$$

где

$$u(\eta) = \frac{dz(\eta)}{d\eta}, \quad \eta = f_0. \quad (2)$$

Величина  $z_0$  определяется как начальная высота ионосферы и связана с нижним пределом  $f_1$  интеграла в (1). Величина  $f_1$  зависит от диапазона рабочих частот ионозонда и определяется как минимальная наблюдаемая на ионограмме частота. Тогда для интегрирования (2) можно положить начальные условия

$$z(f_1) = z_0 \text{ и } u(f_1) = 0, \quad (3)$$

здесь второе условие означает плавное начало ионосферы.

Уравнение (1) является интегральным уравнением типа Вольтера 1-го рода и его можно записать компактно в виде

$$\int_{f_1}^f K(f, \eta) u(\eta) d\eta = y(f), \quad (4)$$

где ядро

$$K(f, \eta) = \frac{\partial}{\partial f} f m_1(f, \eta), \quad (5)$$

а правая часть  $y(f) = h'(f) - z_0$  представляет собой экспериментально определяемую функцию. Таким образом, обратная задача сводится к совместному решению интегрального уравнения (4) и обыкновенного дифференциального уравнения (2) с начальными условиями (3).

Решение интегрального уравнения (4), ядро которого содержит производную от показателя преломления для магнитоактивной плазмы, не имеет аналитического решения и может быть найдено численно с некоторой точностью. При этом правая часть уравнения (4) определяется по экспериментальным данным также с некоторой погрешностью. Поэтому представляется целесообразным использовать для решения уравнения (4) метод регуляризации А.Н. Тихонова аналогично тому, как это было сделано для решения обратной задачи многочастотного доплеровского зондирования искусственных ионосферных возмущений [7]. Тогда методика получения профиля  $z(f_0)$  будет состоять из нескольких этапов:

1) – получение правой части  $y(f)$  для уравнения (4) на равномерной сетке рабочих частот путем интерполяции измеренных значений  $h'(f)$  с помощью кубических сглаживающих сплайнов;

2) – численное решение уравнения (4) методом регуляризации и получение дискретной функции  $\{u(\eta_i)\}$ ;

3) – вычисление  $z(f_0) = \int_{f_1}^{f_0} u(\eta) d\eta$  с помощью какой-либо квадратурной формулы, в результате приближенное решение получается в виде дискретной функции  $\{z(f_k)\}$ .

### Экспериментальные наблюдения ионосферных возмущений

Эксперименты проводились в ИЗМИРАН с помощью ионосферного комплекса Базис-М, который был модернизирован в части формирования ВЧ сигнала возбудителя,

как это было описано выше. На установке проводились измерения, частично приведенные в [3].

Были проведены измерения серии «быстрых» ионограмм в режиме, когда каждая ионограмма измерялась за время около 2 сек, а следующая ионограмма могла быть измерена через 2, 5, 10, 15 сек. Геофизическая обстановка в этот период была слабо возмущенной, это можно видеть на ионограммах, которые наблюдались в дневное время 24 июня 2013 г. от 13<sup>h</sup>11'45" до 13<sup>h</sup>14'45". На рисунках 1 (а) – (н) видно, что в слоях  $F1$  и  $F2$  наблюдается крупная ионосферная неоднородность, проявляющаяся в виде второй ветви на «O»- компоненте ионограммы. Показанные на рисунке 1 ионограммы демонстрируют быструю динамику неоднородностей в ионосфере на масштабах времени десятки секунд.

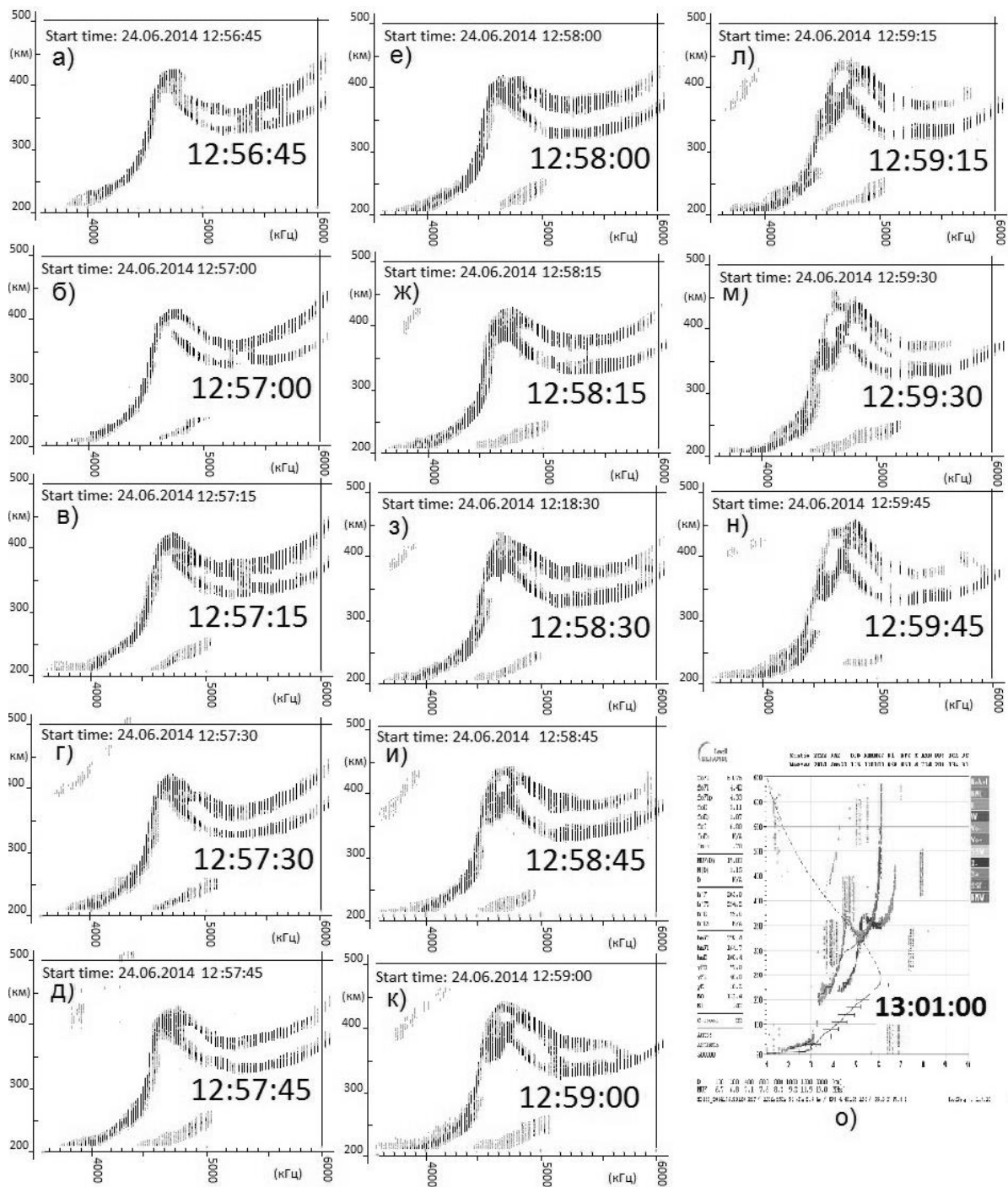
Предварительные эксперименты по скоростной регистрации ионограмм ВЗ через каждые 10 сек показали, что вблизи критических частот  $E$ - и  $F2$ - слоёв действующие высоты отраженных сигналов испытывают значительные вариации, что может быть связано с довольно быстрой динамикой ионосферных неоднородностей на этих высотах.

На рисунках 1(а) - 1(н) показана серия из 13 «быстрых» ионограмм. Ионограммы показаны в выделяемом окне: по действующей высоте от 200 до 500 км, по частоте от 3,5 до 6 МГц. На рисунке 1(о) дополнительно показана наиболее близкая ко времени измерения серии «быстрых» ионограмм стандартная ионограмма постоянно работающего в ИЗМИРАН в пятнадцатиминутном режиме ионозонда DPS4. Полученные экспериментальные данные регистрации «быстрых» ионограмм были использованы для оценки интенсивности «быстрых» возмущений во всей толще ионосферы. Ионограммы на рисунках 1 и аналогичные, были отредактированы оператором, выделялись отражения «о» компоненты первого скачка. Именно в указанные времена на отдельной магнитоионной «о» компоненте наблюдались два луча, которые выделялись как отражения основного (1) первого луча и дополнительного (2) второго луча. Отражения (1,2) интерпретировались как ветви ионограммы, возникшие из-за прохождения неоднородности. При этом были сформированы массивы экспериментальных данных  $\{f_i(1o), h_i'(1o)\}$  и  $\{f_i(2o), h_i'(2o)\}$ , соответствующие первому и второму лучам «о» компоненты первого отражения ионограммы. Ввиду того что низкочастотная часть ионограммы в нашем ионозонде была недостаточно отчетливой (из-за низкой эффективности излучающей антенны на частотах 1 – 3 МГц) низкочастотная часть экспериментальных массивов была заменена на данные, полученные из ионограммы ионозонда DPS4, работавшего в ИЗМИРАН в пятнадцатиминутном режиме. Во всех массивах быстрых ионограмм исследуемого интервала времени в дальнейшей обработке низкочастотная часть была одинаковой, принимались во внимание изменения ионосферы выше 3 МГц.

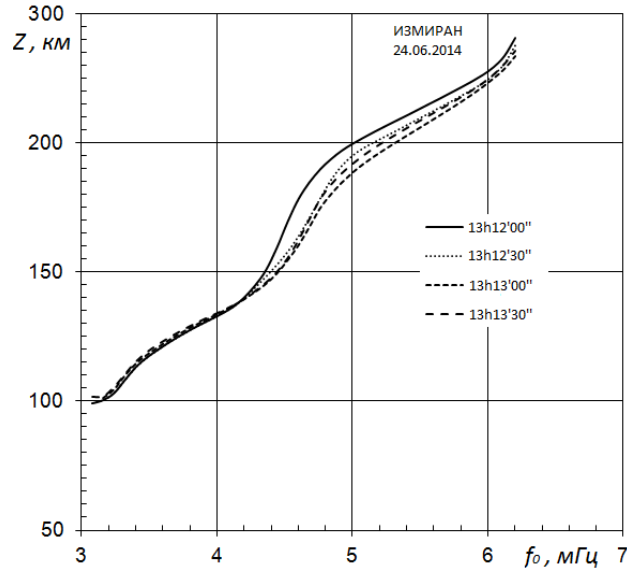
### **Результаты расчетов высотных профилей плазменной частоты**

С помощью описанной методики решения обратных задач с использованием экспериментальных массивов данных  $\{f_i(1o), h_i'(1o)\}$  и  $\{f_i(2o), h_i'(2o)\}$  были рассчитаны высотные профили плазменной частоты для каждого луча.

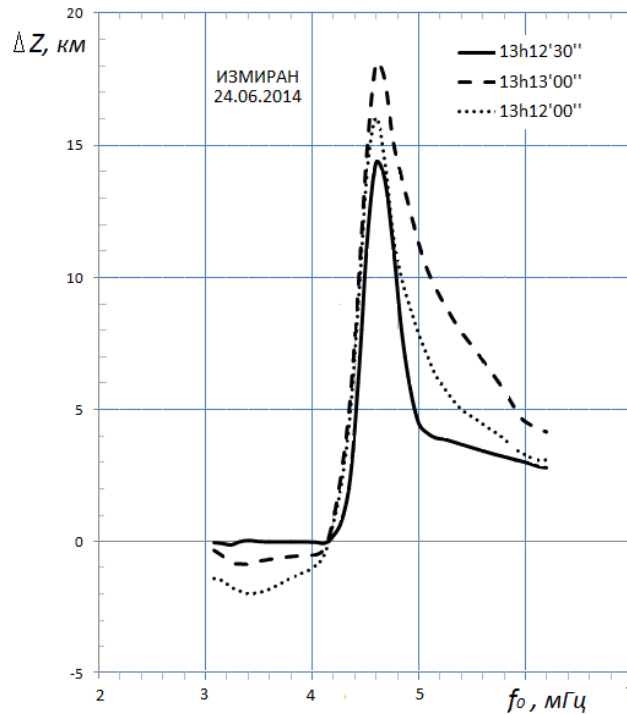
Для всех фрагментов ионограмм, показанных на рисунке 1, отчетливо прослеживались две ветви. Все ионограммы данного фрагмента были обработаны отдельно для обеих ветвей (лучей) для каждого из фрагментов ионограмм. На рисунке 2 показаны  $Z(f_o)$  профили истинной высоты отражения полученные через 30 секунд для времен 13h12'00", 13h12'30", 13h13'00" и 13h13'30". На рисунке 3 приведены разности профилей для лучей 1 и 2, полученные одновременно для моментов времени 13h12'00", 13h12'30", 13h13'00". Разность профилей по высоте достигает примерно 17 км.



**Рис.1. Серия из 13 ионограмм (а – н). Ионограммы показаны в выделяемом окне: по действующей высоте от 200 до 500 км, по частоте от 3.5 до 6 МГц. На (о) показана ионограмма DPS4. Сеанс 24 июня 2014 г.**



**Рис.2. Четыре профиля  $Z(f_0)$  ионосферы, полученные для основного луча ионограммы последовательно через 30 секунд от 13 часов 12 минут 00 секунд до 13 часов 13 минут 30 секунд , 24 июня 2015 г.**



**Рис.3. Разности профилей  $\Delta Z(f_0)$ , полученные между ионограммами на первом и втором лучах в 13h12'00'', 13h12'30'' и 13h13'00'' 24 июня 2014.**

Отметим, что сделанные здесь оценки разности профилей  $\Delta Z(f_0)$  получены в предположении, что каждый профиль  $Z(f_0)$  получен для плоскостойкой ионосферы. Так как в реальности ионосферное возмущение является трехмерным образованием, то полученные выше оценки  $\Delta Z(f_0)$  можно считать первым приближением. Более полная интерпретация результата измерений требует анализа ионограмм с привлечением траекторных расчетов для трёхмерной модели возмущения.

## Заключение

Применение методики быстрой регистрации ионограмм вертикального зондирования позволяет наблюдать динамику кратковременных вариаций профиля плазменной частоты в ионосфере. Было получено, что в слабо возмущенной среднеширотной ионосфере могут возникать быстрые изменения профиля с амплитудой вариации высоты порядка 10 км за время ~30 сек.

Предложенная методика быстрой регистрации ионограмм может применяться не только для ВЗ, но и для других известных видов ВЧ зондирования ионосферы на трассах НЗ, ВНЗ. При внешнем зондировании ионосферы с помощью ИСЗ быстродействующий ионозонд позволит исследовать не только крупномасштабную структуру ионосферы, но также с высоким разрешением регистрировать неоднородности с горизонтальными масштабами порядка 10 км. Особый интерес представляет использование быстрого метода зондирования для диагностики искусственных возмущений электронной концентрации, возникающих в результате нагрева ионосферы мощными радиоволнами, что важно для изучения физических механизмов модификации ионосферы одновременно на различных высотах.

## Литература

1. Радиозондирование ионосферы спутниковыми и наземными ионозондами. Под редакцией В.Б. Лапшина, Труды Института прикладной геофизики им. академика Е.К. Федорова. Спецвыпуск 91, посвященный 75 летию Данилкина Н.П., 2014, ИПГ, Москва, 309С.
2. Lobachevsky L.A., Gruzdev Yu.V., V.Yu. Kim, Mikhaylova G.A., Panchenko V.A., Polimatidi V.P., Puchkov V.A., Vaskov V.V., Stubbe P., Kopka H. / Observations of ionospheric modification by the Tromsø heating facility with the mobile diagnostic equipment of IZMIRAN // Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. V.54, N1, P. 75-85. 1992.
3. Ким В.Ю., Полиматиدي В.П., Щеголев А.Н. / Новый метод регистрации ионограмм. XXIV Всероссийская научная конференция "Распространение радиоволн" // Иркутск, 29 июня – 5 июля 2014 г., Труды конференции. Т. I. 2014. С. 186-188.
4. Галкин А.И., Ерофеев Н.М., Казимировский Э.С., Кокауров В.Д. / Ионосферные измерения // Изд. «Наука», 1971, 174 с.
5. Кольцов В.В., Мирохин А.М., Панова И.Н., / Первичная обработка сигналов в темпе радиозондирования ионосферы // Цифровые ионозонды и их применение. –М. ИЗМИРАН, 1986 г. С. 22 – 29.
6. Гинзбург В.Л. / Распространение электромагнитных волн в плазме // Изд. «Наука», 1967, 684с.
7. Ким В.Ю. / Доплеровская диагностика искусственных возмущений электронной концентрации в ионосфере. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Т.1-3. Ионосферная плазма. // Изд. Янус, Москва, 2009. С.399-407.