



Серия «Науки о Земле»
2011. Т. 4, № 2. С. 53–60

Онлайн-доступ к журналу:
<http://isu.ru/izvestia>

ИЗВЕСТИЯ
*Иркутского
государственного
университета*

УДК 551.510.536

Доплеровское радиозондирование ионосферы Земли и искусственных плазменных образований в верхней атмосфере

И. В. Безлер (BezlerVL@mail.ru), В. Б. Иванов (ivb@ivb.baikal.ru)

Аннотация. В работе представлены результаты восстановления динамики ионосферного профиля и профиля искусственного плазменного образования по данным многочастотного доплеровского радиозондирования.

Ключевые слова: ионосфера, искусственная неоднородность, многочастотное доплеровское радиозондирование.

Введение

В работах авторов [1] были представлены первые результаты обработки экспериментальных данных многочастотного доплеровского зондирования ионосферы и искусственных плазменных образований (ИПО) в ионосфере в эксперименте «ЭКВАТОРИАЛЬНЫЙ ТРИГГЕР». Эксперимент проводился в 1991 г. в Карибском море. Целью эксперимента было комплексное исследование ИПО в ионосфере, инжектированных с борта ракет, запущенных с научно-исследовательского судна «Профессор Зубов» [1; 2]. Наряду с прочими средствами диагностики ИПО и ионосферы в эксперименте были задействованы средства радиофизического мониторинга, включая многочастотное доплеровское зондирование на частотах декаметрового диапазона. Одновременно с исследованием собственно искусственных плазменных облаков проводилось зондирование и фоновой ионосферы. Несмотря на то, что эксперимент проводился достаточно давно, результаты обработки и интерпретации данных, полученных при его проведении, опубликованы весьма скупо. Данная работа посвящена в основном исследованию динамики ИПО и фоновой ионосферы.

Исходные данные

В работе [1] авторы подробно описывали исходные данные для исследований, а также методику и результаты их первичной обработки. Здесь следует напомнить, что доплеровские измерения проводились в режиме вертикального зондирования ионосферы и наклонного зондирования ИПО при совмещении пункта излучения и приема на 8 частотах: 3.03, 3.73, 4.45, 6.35, 7.03, 8.07, 9.31, 10.93 МГц. Данные, подлежащие обработке, представляют собой оцифрованные значения сигнала, полученного гетероди-

нированием отраженного ионосферой сигнала с опорной частотой, отличающейся на 4 Гц от излучаемой несущей. Оцифровка производилась с дискретностью 1/32 с.

Для исследования динамики ионосферного профиля и профиля ИПО по методике [3], необходимо иметь временной ход доплеровского сдвига частоты на всех частотах. Для получения этой информации из исходных данных пригодна методика, описанная в [1].

На рис. 1 показана сглаженная доплерограмма для ионосферы, в течение 10 мин, начиная с 20:31 местного времени, полученная по методике [1]. По горизонтальной оси отложено время в секундах от начала сеанса, по вертикали – доплеровское смещение частоты для всех восьми каналов по возрастанию частоты снизу вверх, 1-й канал – самый низкочастотный. Все графики представлены в сравнении с масштабом в 5 Гц.

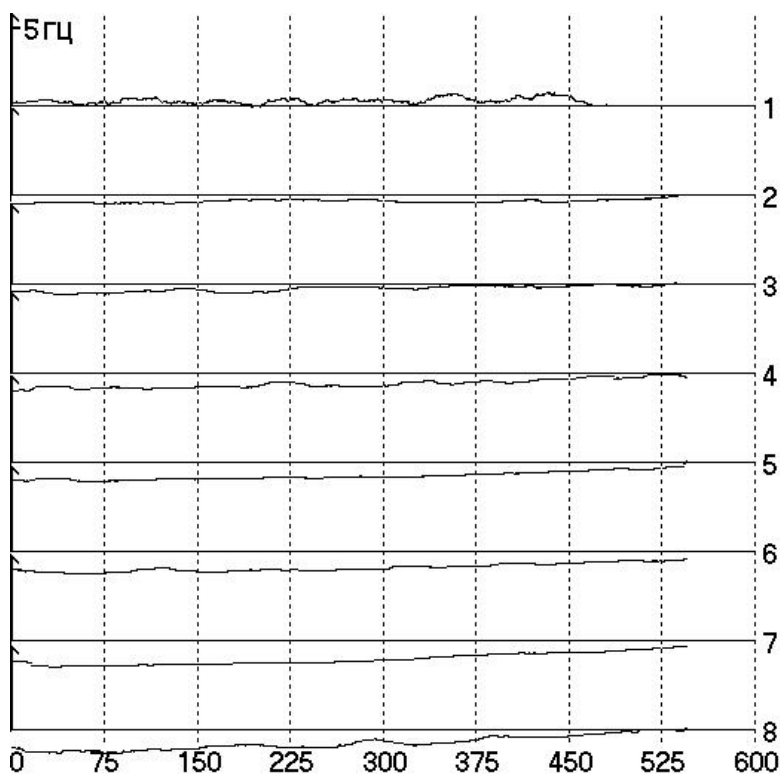


Рис. 1. Временной ход доплеровского сдвига сеанса 20:31 после сглаживания

Хорошо просматривается уменьшение по модулю смещения частоты (но в области отрицательных значений на всех каналах кроме девятого). Абсолютные значения доплеровского смещения составляют величины порядка 1 Гц, что естественно для ионосферы. Также наблюдается приближение доплеровского сдвига к нулю на всех каналах ближе к концу сеанса, что особенно хорошо просматривается на самом высокочастотном канале.

Уже по этой доплерограмме можно качественно судить о динамике ионосферного профиля: ионосфера достаточно равномерно поднимается (что естественно для экваториальной ионосферы в вечерние часы), но скорость подъема постепенно падает, и в конце сеанса возможен уже обратный ход профиля вниз.

На рис. 2 представлен временной ход доплеровского сдвига для ИПО, полученный по той же методике, что и для естественной ионосферы [1].

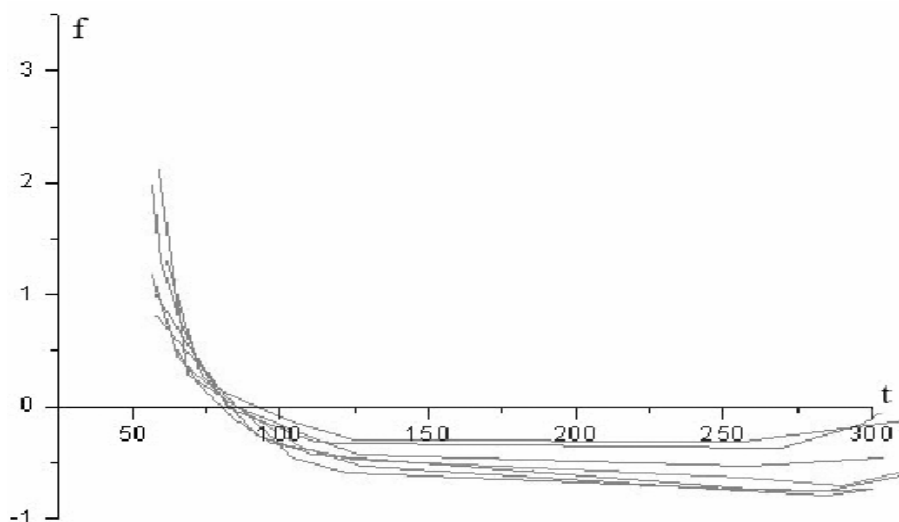


Рис. 2. Временной ход доплеровского сдвига частот для шести каналов для ИПО

Рисунок 2 построен начиная с середины сеанса 20:27, где происходила наиболее активная фаза ИПО. По горизонтальной оси отложено время в секундах, за 0 принят начальный момент сеанса 20:27, по вертикали – доплеровское смещение частоты в Гц. Конец временной оси на рис. 2 взят из сеанса 20:31, а между сеансами сделана интерполяция. Хорошо видно, что доплеровское смещение частоты достаточно быстро меняется, при этом меняя знак. Это вызвано быстрыми изменениями концентрации плазмы в облаке. Также очевидно, что динамика ИПО существенно отличается от динамики естественной ионосферы, что следует уже из внешнего вида доплерограмм.

Описание методики восстановления профиля

Методика восстановления динамики ионосферного профиля состоит в следующем [3]. Известно, что набег фазы сигнала при прохождении до уровня отражения и обратно составляет величину:

$$\phi(f) = \frac{4\pi f}{c} \left(z_0 + \int_{z_0}^{z_{omp}} \sqrt{1 - \frac{f_p^2(z)}{f^2}} dz \right), \quad (1)$$

где f – рабочая частота сигнала, $f_p(z)$ – зависимость плазменной частоты от высоты, z_0 – уровень начала ионосферы, c – скорость света. Считая $f_p(z)$ монотонной функцией, можно перейти к обратной ей зависимости $z(f_p)$ и произвести интегрирование по частям:

$$\begin{aligned} \phi(f) &= \frac{4\pi f}{c} \left(z_0 + \frac{1}{f} \int_0^f \sqrt{f^2 - f_p^2} \frac{\partial z(f_p)}{\partial f_p} df_p \right) = \\ &= \frac{4\pi f}{c} \left(z_0 + \frac{1}{f} \left(z(f_p) \sqrt{f^2 - f_p^2} \Big|_0^f + \int_0^f \frac{f_p z(f_p) df_p}{\sqrt{f^2 - f_p^2}} \right) \right). \end{aligned} \quad (2)$$

Учитывая, что на практике может быть измерено только изменение фазы сигнала $\Delta\phi(f)$, и полагая $z(0) = 0$, получим:

$$\frac{\Delta\phi(f)c}{2\pi} = 2 \int_0^f \frac{\Delta z(f_p) f_p df_p}{\sqrt{f^2 - f_p^2}}. \quad (3)$$

Это интегральное уравнение Абеля [4], имеющее решение:

$$\Delta z(f_p) = \frac{c}{2\pi^2} \int_0^f \frac{\frac{\partial \Delta\phi(f_p)}{\partial f_p} df_p}{\sqrt{f^2 - f_p^2}}. \quad (4)$$

Последнее соотношение позволяет найти изменение высоты отражения сигнала на частоте f , зная изменение набега фазы $\Delta\phi(f_p)$, которое может быть найдено интегрированием по времени значения доплеровского смещения частоты:

$$\Delta\omega = -\frac{\partial\phi}{\partial t}. \quad (5)$$

Имеющиеся в распоряжении исходные данные позволяют найти изменение набега фазы только на восьми фиксированных частотах. Тогда, считая производную в правой части формулы постоянной между каждыми двумя последовательными фиксированными частотами, можно получить следующую расчетную формулу:

$$\Delta z(f_k) = \frac{\tilde{n}}{2\pi^2} \sum_{i=1}^k \frac{\Delta\phi(f_i) - \Delta\phi(f_{i-1})}{f_i - f_{i-1}} \arcsin\left(\frac{f_p}{f_k}\right) \Big|_{f_{i-1}}^{f_i}. \quad (6)$$

Особенностью данного метода является необходимость знания начального профиля плазменной частоты в ионосфере. При наличии ионограмм вертикального зондирования, как это имело место в эксперименте, и в предположении о монотонном характере профиля до максимума слоя начальный профиль может быть получен известным способом из высотно-частотной характеристики вертикального зондирования.

Результаты

На рис. 3 показано применение данной методики для расчета динамики вертикального профиля плазменной частоты в фоновой ионосфере в сеансе длительностью 10 мин, начиная с 20:31 местного времени.

На рис. 3 по горизонтали отложены частоты, для которых рассчитывается изменение высоты отражения сигнала относительно начального профиля. По вертикали отложена высота отражения сигнала в километрах.

Кривые построены с интервалом 40 с. Нижние и верхние части профилей изображены отдельно. В качестве начального профиля (нижняя кривая) использован результат пересчета ионограммы в вертикальный профиль, аппроксимированный параболой. За ноль по высоте принята высота отражения самой низкой частоты зондирования в эксперименте (3 МГц).

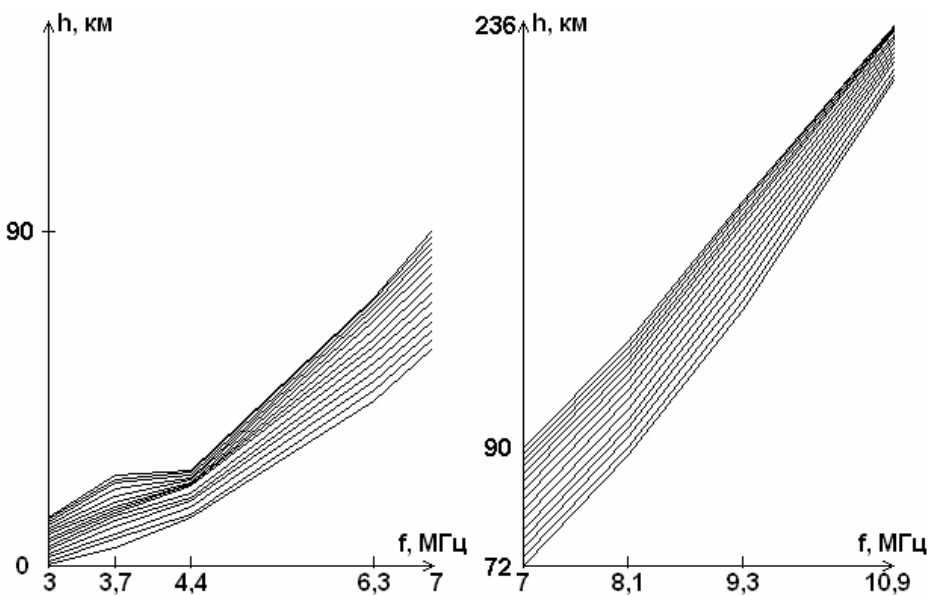


Рис. 3. Динамика ионосферного профиля сеанса 20:31

Хорошо видно, что имеет место характерный для вечерней экваториальной ионосферы подъем профиля. Из представленного графика может быть, в частности, определена скорость подъема отдельных участков профиля. Важным является обнаружение нарастание вертикального градиента плазменной частоты градиента в районе 4,5 МГц. Дело в том, что одной из задач эксперимента являлось подтверждение гипотезы триггерного характера перехода экваториальной ионосферы в неустойчивое состояние. Формирование больших вертикальных градиентов концентрации плазмы, наблюдаемое на рис. 3, как раз может способствовать развитию неустойчивости. Можно обратить внимание и на то, что в конце сеанса наблюдается начало опускания профиля на верхних частотах.

Восстановление динамики профиля возвратно-наклонного зондирования искусственного плазменного образования позволяет получить зависимость расстояния до точки отражения сигнала от частоты. На рис. 4 показаны результаты работы методики. В отличие от варианта зондирования собственно ионосферы здесь мы не имеем надежной информации о начальном профиле распределения плазменной частоты в ИПО по дальности. По этой причине в качестве такового выбран гауссовский профиль, задаваемый формулой:

$$f = f_0 + A \cdot \exp\left(-\frac{(h - h_0)^2}{B}\right), \quad (7)$$

которая разрешается относительно высоты отражения $h(f)$ как:

$$h(f) = h_0 - \sqrt{-B \cdot \ln\left(\frac{f - f_0}{A}\right)} \quad (8)$$

В формулах (7) и (8) использованы следующие параметры: $B = 300$ км, $f_0 = 3,6$ МГц, $A = 7$ МГц, h_0 – произвольно. Параметры подобраны так, чтобы была видна крутизна гауссовского импульса на нижних частотах.

Рисунок 4 содержит 9 изображений, на каждом из которых представлен исходный профиль (гладкая кривая) и профили в каждый последующий момент времени (ломаная кривая). Изображения построены с интервалом 3 с. По оси абсцисс отложены частоты зондирования, по оси ординат – высота отражения сигнала в километрах.

Видно, что эволюция облака проходит в несколько этапов. На первом этапе имеет место увеличение концентрации плазмы во всем облаке, проявляющееся как его расширение, что соответствует процессу начального плазмообразования. Это видно на рис. 4(1) как опускание всего профиля ниже начального. Далее содержание плазмы увеличивается только на нижних частотах, что соответствует перетеканию плазмы из центра облака на периферию. На рис. 4(4) видно, что профиль на нижних частотах лежит максимально низко, в то время как на верхних частотах профиль уже значительно выше начального. В дальнейшем имеет место почти равномерное падение концентрации плазмы во всем облаке, что изображается как подъем всего профиля выше начального. Количественные характеристики рассматриваемого процесса могут быть полезными для проверки различных теоретических моделей динамики искусственных плазменных образований.

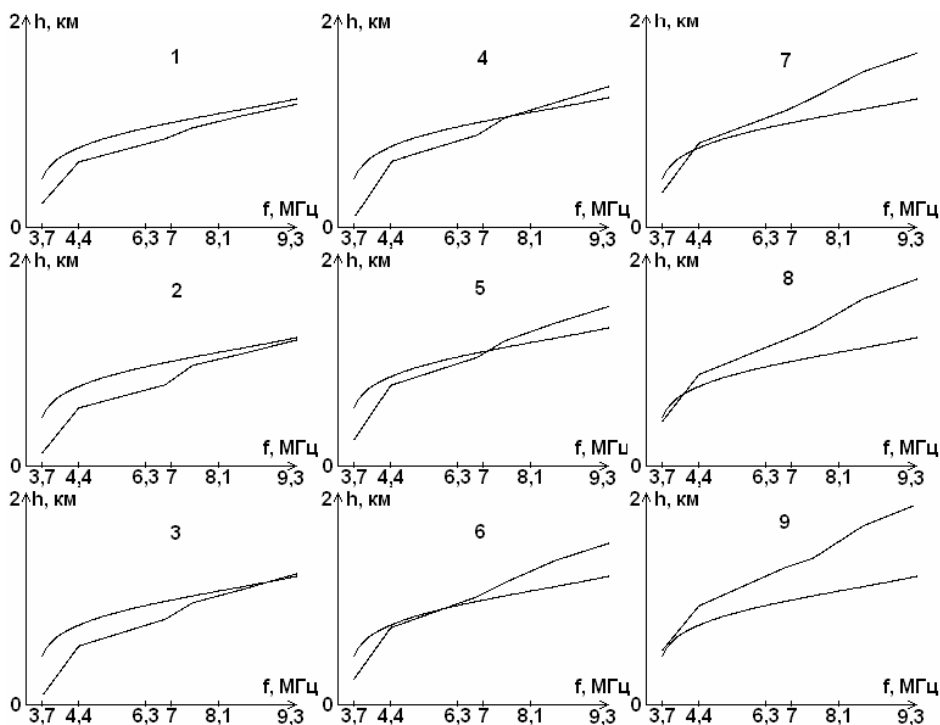


Рис. 4. Динамика ИПО

Выводы

Метод многочастотного доплеровского зондирования позволяет исследовать динамику ионосферы и искусственных плазменных образований в ионосфере с достаточной количественной точностью даже при относительно небольшом количестве зондирующих радиочастот.

Полученные результаты свидетельствуют в пользу гипотезы о триггерном характере запуска неустойчивостей в низкоширотной ионосфере.

Исследование с помощью многочастотного доплеровского зондирования искусственных плазменных образований позволяет количественно оценить пространственно-временные характеристики эволюции этих объектов.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект 14.740.11.0078 федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.).

Список литературы

1. Безлер И. В. Многочастотное доплеровское радиозондирования ионосферы в эксперименте «ЭКВАТОРИАЛЬНЫЙ ТРИГГЕР» / И. В. Безлер, В. Б. Иванов // Космические исследования. – 2011. – Т. 49(3). – С. 205–209.

2. Эксперимент «Экваториальный триггер»: стимулированное развитие плазменных неустойчивостей и неоднородностей в экваториальной ионосфере / В. Ю. Гайдуков, С. А. Намазов, М. А. Никитин, Ю. А. Романовский // Косм. исслед. – 1993. – Т. 31(1). – С. 63.

3. *Ким В. Ю.* Решения обратной задачи многочастотного доплеровского зондирования искусственного возмущения ионосферы с помощью инверсии Абеля и сглаживающих сплайнов / В. Ю. Ким, В. А. Панченко. – М. : препринт ИЗМИРАН. – 1988. – № 52. – 25 с.

4. *Преображенский Н. Г.* Инверсия Абеля и ее обобщения / Н. Г. Преображенский. – Новосибирск : ИТПМ СО АН СССР, 1978. – 272 с.

Doppler radio sounding of Earth' s ionosphere and of artificial plasma cloud in the top atmosphere

I. V. Bezler, V. B. Ivanov

Annotation. In this article the results of reconstruction of dynamics of the ionosphere profile and of artificial plasma cloud profile using data of multi-frequency Doppler radio sounding are presented.

Key words: ionosphere, artificial plasma cloud, multi-frequency Doppler sounding.

Безлер Илья Валентинович
аспирант
инженер кафедры радиофизики
Иркутский государственный университет
664003, г. Иркутск, бул. Гагарина 20
тел.: 89501019024

Иванов Всеволод Борисович
доктор физико-математических наук;
профессор кафедры радиофизики
Иркутский государственный университет
664003, г. Иркутск, бул. Гагарина 20
тел.: 89648164650