

## **Перспективы использования Иркутского радара некогерентного рассеяния в качестве риометра изображения и радиогелиографа.**

Васильев Р.В., Кушнарёв Д.С., Лебедев В.П., Медведев А.В., Невидимов Н. И., Ратовский К.Г.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 126а, а/я 291. [roman\\_vasilyev@iszf.irk.ru](mailto:roman_vasilyev@iszf.irk.ru)*

*Космическое радиоизлучение является важным источником шумового фона в задачах радиофизических исследований ионосферы. Вариации фонового сигнала и мерцания дискретных радиоисточников позволяют исследовать вариации плотности ионосферной плазмы и определять степень неоднородности ионосферы. Иркутский радар некогерентного рассеяния (ИРНР) обладает узкой диаграммой направленности, и способен просматривать широкий диапазон углов на небесной сфере. Время сканирования сектора  $40^\circ$  с шагом  $0.5^\circ$  составляет несколько секунд. Это позволяет использовать ИРНР, работающий в пассивном режиме, в качестве риометра изображения. На протяжении нескольких месяцев наблюдений мы исследовали мерцания дискретного радиоисточника Лебедь-А, и нашли хорошее согласие наблюдаемых событий с возникновением диффузных треков на ионограммах Иркутского Дигизонда. ИРНР, работающий в пассивном режиме, также чувствителен к вариациям потока солнечного радиоизлучения и способен наблюдать солнечные вспышки с хорошим временным и пространственным разрешением.*

*Space radio emission is the important source of background noise for radio physical investigation of the ionosphere. Variations of the background signal and scintillation of the discrete radio sources allow defining some ionosphere characteristics such as plasma density variations and degree of plasma inhomogeneity. The Irkutsk incoherent scatter radar (IISR) has narrow palm-like direction pattern. With this pattern IISR scans a wide sector of elevation angles of the celestial sphere. The sweeping time of a sector  $40^\circ$  with step  $0.5^\circ$  is around several seconds. Therefore IISR is capable to work in the passive mode as a imaging riometer. As a result of several months of observations in the passive mode we studied a number of scintillation events and found a good agreement between the scintillation and spread-F events observed by the Irkutsk Digisonde. The radar passive mode is also sensitive to the solar events and is capable to observe solar radio emission objects with good time resolution and on a wide spatial range.*

Риометры изображения [1] это современные физические инструменты предназначенные для измерения поглощения радиоволн (в основном КВ диапазона) в ионосфере Земли. Эти устройства вносят значительный вклад в комплексные исследования солнечной активности, поведения магнитосферы, полярных сияний и распространения радиоволн. Конструктивно риометр изображения состоит из набора антенн формирующих многолепестковую диаграмму направленности и приёмной аппаратуры позволяющей построить карту мощности радиоизлучения на наблюдаемом участке небесной сферы. Применяя традиционную методику вычитания текущего значения мощности из усреднённого за некоторый интервал наблюдений, можно построить изображение крупномасштабных возмущений плотности ионосферной плазмы, определить их размеры, направления и скорости перемещения.

Другим интересным аспектом наблюдений выполняемых на риометрах изображения является регистрация мерцаний дискретных космических радиоисточников [2]. Также как звёзды в видимом диапазоне мерцают благодаря неоднородностям коэффициента преломления в атмосфере, в радиодиапазоне дискретные радиоисточники будут мерцать на мелкомасштабных неоднородностях плотности ионосферной плазмы. Характеристики этих мерцаний отражают

интенсивность, характерные размеры и скорости перемещения мелкомасштабных ионосферных неоднородностей.

Иркутский радар некогерентного рассеяния (ИРНР) [3], [4] является составной частью сети радаров НР расположенных по всему свету. Географическое положение радара (52°52' С. 103°15' В.) подразумевает исследование среднеширотной ионосферы. Загруженность радара около ста дней в году, в остальное время ИРНР способен наблюдать космический ради шум и его вариации. В работе описаны первые попытки организации пассивных наблюдений на ИРНР.

ИРНР является моностатическим радаром с частотным сканированием. Антенна радара состоит из двух независимых смежных рупоров (полурупоров) каждый из которых подключен к отдельному передатчику и регистрирующей системе. Общая апертура антенны 12×246 м. Диаграмма направленности полурупоров асимметрична по отношению к частям света. Ширина диаграммы направленности в меридиональной плоскости 0.5° в плоскости восток-запад 20°. Сканирование осуществляется в меридиональной плоскости. Диапазон рабочих частот радара 154-162 МГц. 154 МГц означает вертикальное положение диаграммы направленности, 162 МГц соответствует наклону ДН на 30°.

Импульсы излучения ИРНР синхронизованы с внешним тактовым сигналом, поступающим с частотой 24 Гц. Это необходимо для того, чтобы исключить взаимное влияние соседних передающих станций. Приём ведётся на протяжении 8 мс после посылки зондирующего импульса. Приёмный тракт полурупора содержит ряд фильтров и гетеродинов при помощи которых выбирается направление принимаемого сигнала и происходит понижение принимаемого частотного диапазона вниз, к рабочему диапазону АЦП (рис. 1).

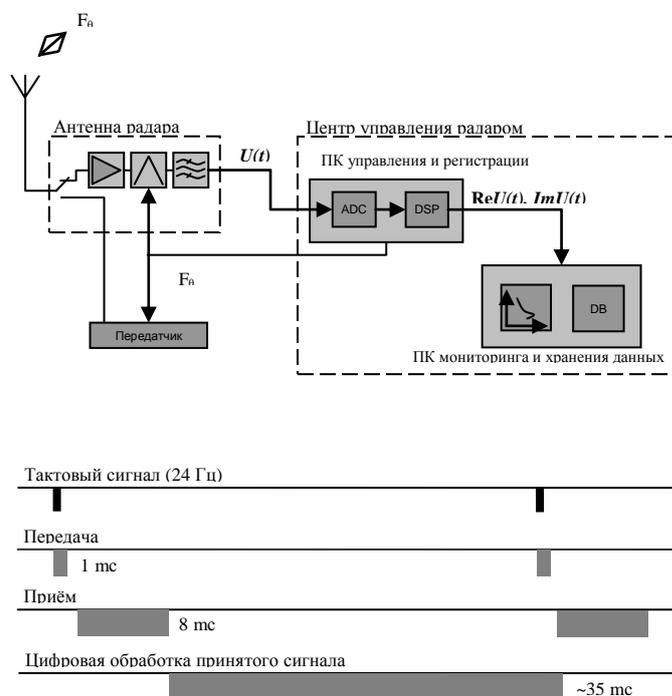
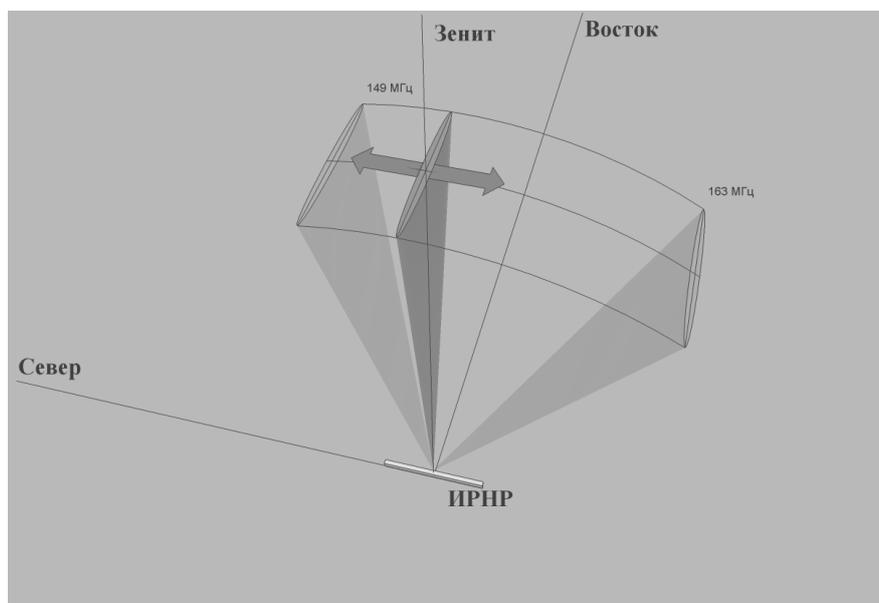


Рис. 1. Схематическое изображение и временная диаграмма работы ИРНР.

Регистрация обработанного сигнала осуществляется шестнадцатиразрядным АЦП с максимальной частотой оцифровки 1 МГц. Шаг оцифровки может варьироваться в зависимости от выполняемой задачи. После АЦП сигнал поступает в цифровой сигнальный процессор, где происходит разложение принятого сигнала в квадратуры. Полученные квадратурные компоненты сигнала сохраняются в базе данных ИРНР.

ИРНР работает в пассивном режиме с мая 2011. Пассивный режим работы заключается в обычной процедуре регистрации сигналов без посылки зондирующего импульса. Частота, на которой ведётся регистрация сигналов, может изменяться в каждом такте приёма. Таким образом, можно организовать относительно быстрое сканирование сектора обзора ИРНР. В пассивном режиме диапазон рабочих частот радара расширен до 149-163 МГц, это увеличивает сектор обзора на 10°-15°. Весь диапазон разбит на 88 частот отстоящих друг от друга на 164 кГц (0.5°). Однократное сканирование сектора обзора осуществляется за время  $88 \times (1/24) = 3.67$  секунд. Программа управления ИРНР осуществляет смену частоты приёма таким образом, чтобы организовать непрерывное циклическое сканирование сектора обзора. Непрерывно сканирующий сектор обзора радар можно рассматривать как риометр изображения с диаграммой направленности состоящей из 88 лепестков протяжённых вдоль линии меридиана Рис. 2.



**Рис.2. Сектор обзора ИРНР.**

Архитектура компьютерной сети управляющей ИРНР позволяет проводить быстрые вычисления средней мощности  $P_{u,d}$  и коэффициента корреляции принимаемых сигналов  $\eta_{ud}$  без потери производительности.

$$P_{u,d} = \langle |U_{u,d}|^2 \rangle \quad (1)$$

$$\eta_{ud} = \frac{\langle U_u \cdot U_d^* \rangle}{\sqrt{\langle |U_u|^2 \rangle \langle |U_d|^2 \rangle}} \quad (2)$$

где  $u, d$  – индексы обозначающие разные полурупоры. Эти величины усредняются за 8 мс. Шаг оцифровки принимаемого сигнала в пассивном режиме работы 10 мс. Таким образом, усреднение проводится по  $N = 800$  элементам.

Для того чтобы точка на небесной сфере переместилась на угол равный минимальной ширине диаграммы направленности требуется около одной минуты. За это время радар успевает совершить 18 сканирований сектора обзора. Это позволяет получить статистические параметры вычисляемых величин: среднюю мощность  $\langle P_{u,d} \rangle$ , и её стандартное отклонение  $\sigma(P_{u,d})$ :

$$\langle P_{u,d} \rangle = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (P_{u,d})_i \quad (3)$$

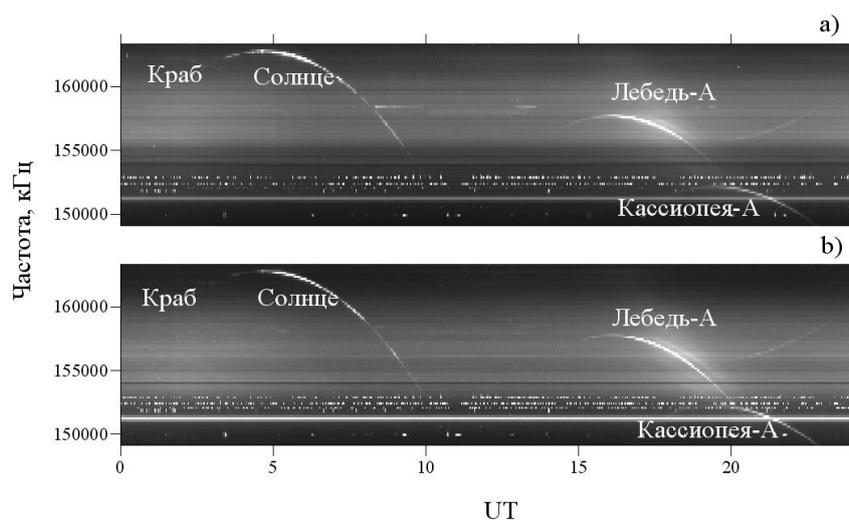
$$\sigma(P_{u,d}) = \sqrt{\langle P_{u,d}^2 \rangle - \langle P_{u,d} \rangle^2} \quad (4)$$

где  $M=18$ , и  $\langle P_{u,d}^2 \rangle$  – средний квадрат мощности:

$$\langle P_{u,d}^2 \rangle = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (P_{u,d}^2)_i \quad (5)$$

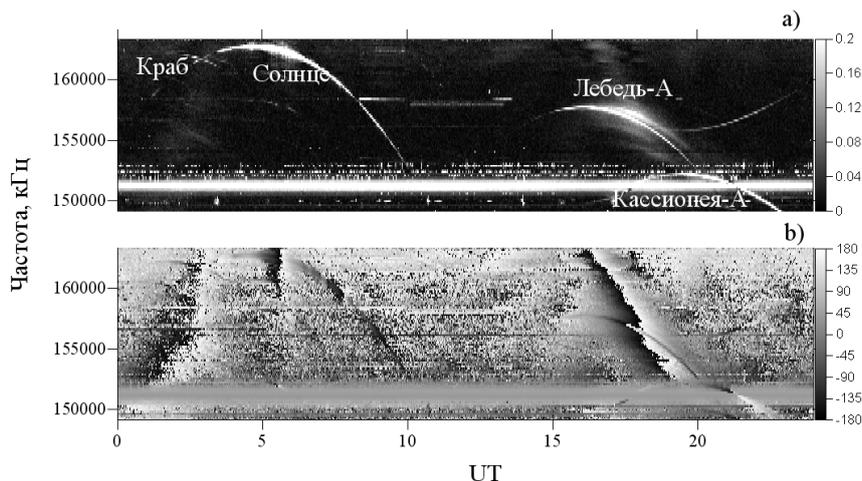
Для коэффициента корреляции в этом случае просто увеличивается время усреднения с 8 мс до  $8 \times M = 144$  мс. Таким образом, в выражении (2) количество элементов для усреднения увеличивается до  $N \times M = 14400$  элементов.

Поведение усреднённой мощности для обоих полурупоров в течение суток приведено на Рис. 3.



**Рис. 3. Мощность шумового сигнала принимаемого на ИРНР в течение суток. Интенсивность серого цвета отражает величину наблюдаемой мощности. а), б) – разные полурупоры.**

Дискретные радиоисточники выглядят как гладкие треки на этой диаграмме. Поведение коэффициента корреляции изображено на рис 4. Корреляция сигналов позволяет устранить случайные шумы в приёмнике и радиоэфире, это приводит к тому, что треки дискретных радиоисточников на этой характеристике выглядят более отчётливо.

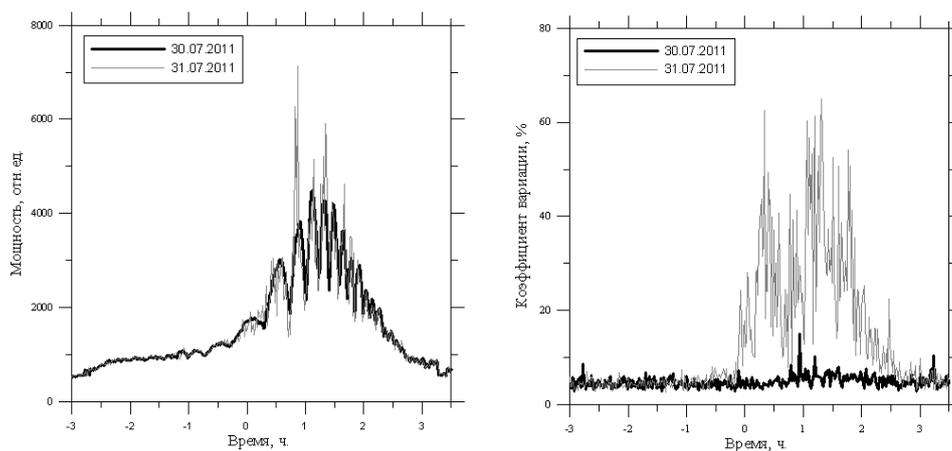


**Рис. 4. Коэффициент корреляции шумовых радиосигналов принимаемых в разных полурупорах. а) – модуль, б) – фаза коэффициента корреляции.**

Один из наиболее мощных дискретных радиоисточников проходящий через сектор обзора ИРНР хорошо известный Лебедь-А. Трек этого радиоисточника хорошо аппроксимируется аналитической кривой, что позволяет провести селекцию мощности радиоисточника проходящего через сектор обзора. Квазипериодическая кривая (Рис. 5) отражает прохождение радиоисточника через различные лучи составной диаграммы направленности. Таким же образом может быть получено среднеквадратичное отклонение. Величина наименее подверженная влиянию диаграммы направленности это коэффициент вариации  $\delta_{u,d}$ , который определяется как:

$$\delta_{u,d} = \frac{\sigma(P_{u,d})}{\langle P_{u,d} \rangle} \cdot 100 \quad (6)$$

На рис. 5 приведена величина наблюдаемой мощности радиоисточника и её коэффициент вариации для двух разных дней. Хорошо видно, что один из дней был относительно спокойным, в то время как в другой происходили значительные вариации наблюдаемой мощности.



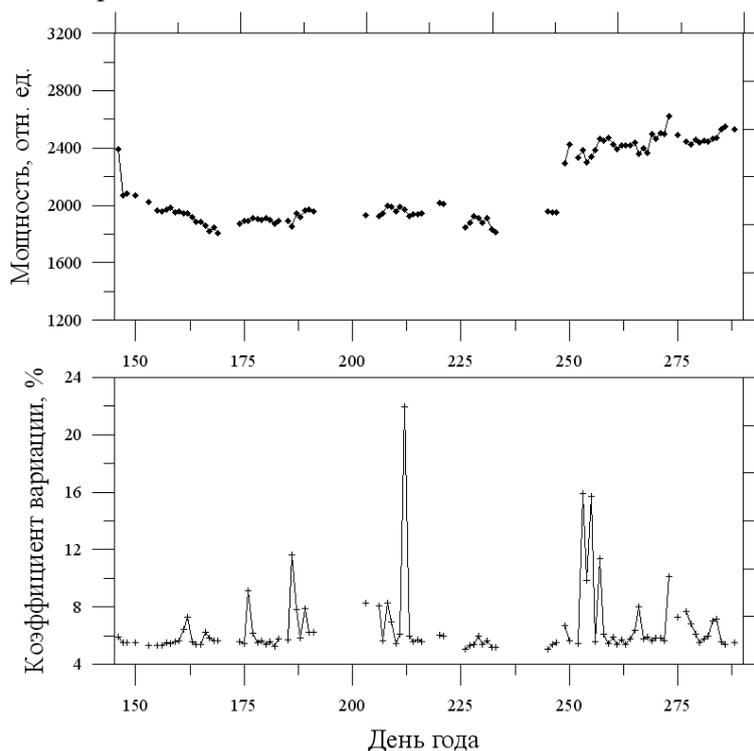
**Рис. 5. Поведение наблюдаемой мощности радиоисточника (слева) и её коэффициента вариации (справа) в течение двух различных дней. Чёрная линия спокойный день, серая – день с мерцаниями радиоисточника.**

Для получения величины отражающей состояние радиоисточника в день наблюдения его наблюдаемая мощность и коэффициент её вариации могут быть усреднены по всему интервалу наблюдения и между полурупорами:

$$\bar{P} = \sum_{l=1}^Q \left( \frac{\langle P_u \rangle_l + \langle P_d \rangle_l}{2} \right) \quad (7)$$

$$\bar{\delta} = \sum_{l=1}^Q \left( \frac{(\delta_u)_l + (\delta_d)_l}{2} \right) \quad (8)$$

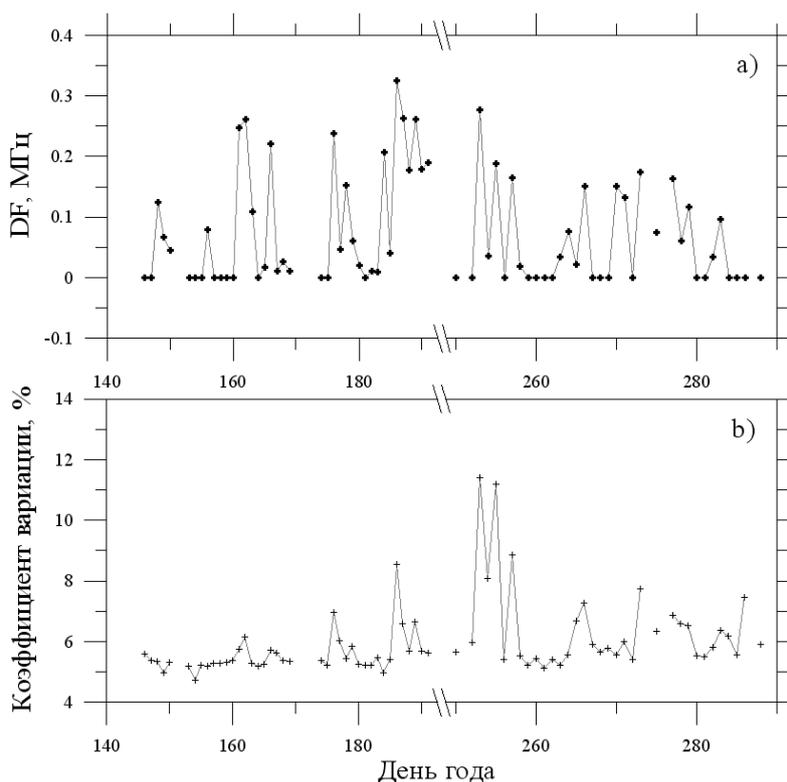
где Q число точек вдоль трека радиоисточника. Поведение величин в течении всего времени наблюдений приведено на Рис. 6.



**Рис. 6. среднесуточная мощность и среднесуточный коэффициент вариации мощности радиоисточника Лебедь-А.**

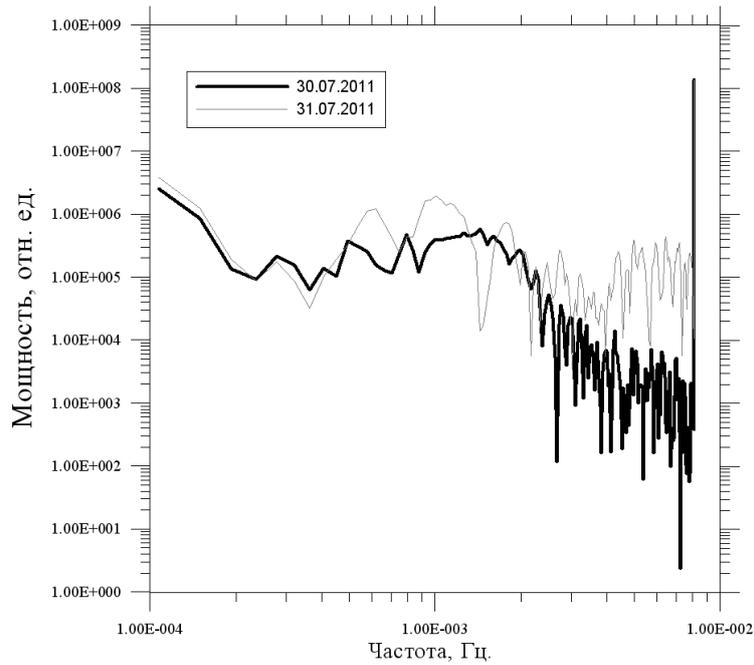
Плазма с неоднородной плотностью, перемещающаяся поперёк линии взгляда на источник приводит к модуляции принимаемого радиосигнала и возникновению мерцаний дискретного радиоисточника. В соответствии с [2] основной вклад в мерцания вносят плазменные неоднородности с размером близким к размеру первой зоны Френеля  $\Lambda_{Fr} = \sqrt{R \cdot \lambda}$  для регистрируемых радиоволн, R расстояние до неоднородности, длина волны. Небесные объекты с угловым размером большим, чем первая зона Френеля  $\Theta_{Fr} = \sqrt{\lambda/R}$  не будут мерцать из-за некогерентного сложения полей приходящих из различных точек радиоисточника. Угловой размер радиоисточника Лебедь-А около половины минуты, угловой размер первой зоны Френеля для межпланетной плазмы:  $\Theta_{Fr} \sim 0.8''$  (R - одна астрономическая единица), а для ионосферы:  $\Theta_{Fr} \sim 8' \div 11'$  (R ~ 250-300 км). Можно предположить, что в основном наблюдаемые на ИРНР мерцания Лебедь-А обусловлены неоднородностями ионосферной плазмы с характерным размером  $\Lambda_{Fr} \sim 600 \div 800$  м.

Хорошо известно, что мерцания дискретных радиоисточников связаны с возникновением размытия треков ионограмм. Поэтому интересно провести сравнение мерцаний наблюдаемых на ИРНР с величиной частотного размытия треков ионограмм – DF наблюдаемых на Иркутском дигизонде DPS-4 [5], [6] который расположен на расстоянии около ста км от ИРНР. Величина частотного размытия определялась с использованием интерактивного приложения по обработке ионограмм SAO Explorer [7]. На Рис. 7 видно, что полученные величины ведут себя похожим образом. Различие можно объяснить неодинаковой чувствительностью ИРНР и DPS-4 к неоднородностям одинакового масштаба [8], [9].



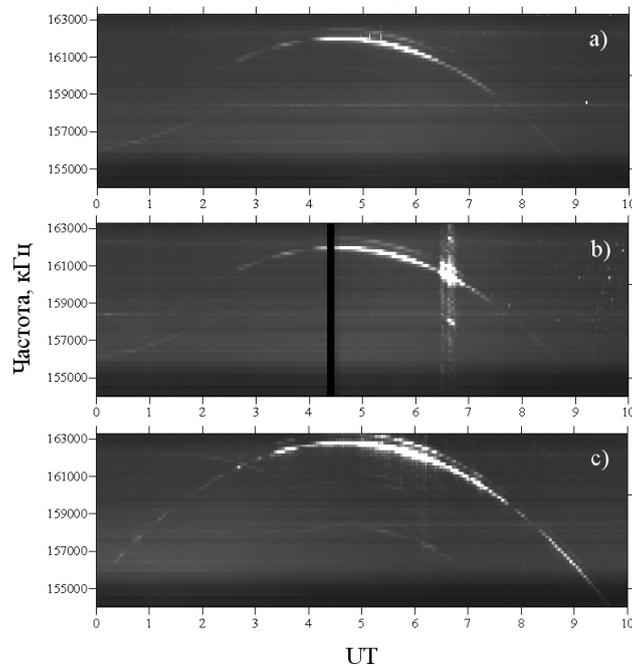
**Рис. 7. Среднесуточная величина частотного разброса на ионограммах – а), и среднесуточная величина коэффициента вариации радиосточника Лебедь-А – б).**

Спектральный состав вариаций мощности радиосточника в реализованном режиме измерений не полностью отражает картину мерцаний. Временное разрешение системы приблизительно одна минута. Это не позволяет в полной мере проанализировать спектры мерцаний для того, чтобы получить информацию о спектральном составе неоднородностей и скоростях их перемещения (Рис. 8). На сегодняшний день в ИРНР есть, по крайней мере, два пути решения этой проблемы. Первый заключается в установке новых регистрирующих систем, способных вести оцифровку без понижения частоты принимаемого сигнала в полосе 150 МГц и применении алгоритма БПФ для получения «мгновенных» значений мощности внутри сектора обзора. Второй, наименее затратный метод, заключается в уменьшении количества частот необходимых для сканирования или в уменьшении числа сканирований сектора обзора которые требуются для получения средней мощности и её стандартного отклонения.



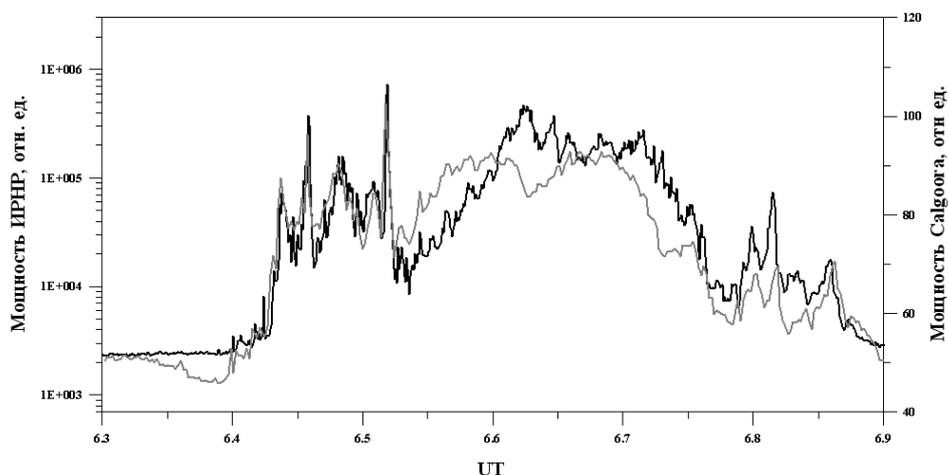
**Рис. 8. Спектры вариации наблюдаемой мощности радиосточника Лебедь-А полученные для спокойного дня (чёрная линия), и дня с мерцаниями (серая линия)**

Другим интересным радиосточником доступным для наблюдений на ИРНР с мая по сентябрь является Солнце. Три различных дня наблюдений приведены на Рис. 9. Большая апертура антенны ИРНР и динамический диапазон регистрирующей аппаратуры 70 дБ позволяют проводить наблюдения потока солнечного радиоизлучения с хорошей чувствительностью, а также проводить абсолютную калибровку потока по дискретным космическим радиосточникам.



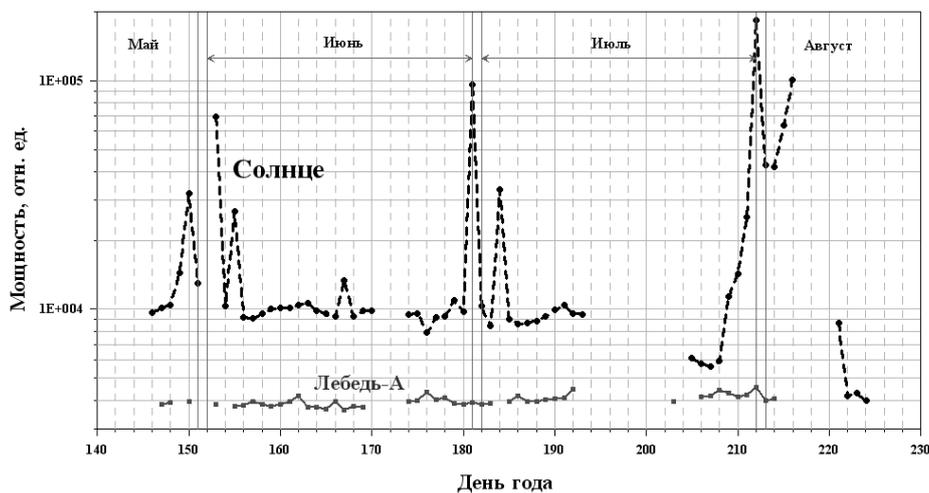
**Рис. 9. Три дня наблюдений Солнца на ИРНР. а) спокойное Солнце, б) солнечная вспышка М класса, с) повышенный уровень потока солнечного радиоизлучения.**

На рис 10. приведено сравнение данных полученных на ИРНР и в обсерватории Culgooga при наблюдении солнечной вспышки 7 июня 2011 г. Наблюдается хорошее согласие полученных данных, за исключением поздней стадии вспышки. По-видимому, различие обусловлено поляризацией принимаемых радиоволн. Инструмент Culgooga принимает радиоволны с круговой поляризацией, в то время как у ИРНР в апертуре установлен поляризационный фильтр, пропускающий радиоволны с линейной поляризацией.



**Рис. 10. Сравнение динамики солнечной вспышки 06.07.2011 по данным ИРНР (серая кривая) и Culgooga (чёрная кривая).**

В период с мая по сентябрь 2011 года на ИРНР было выявлено квазипериодическое увеличение потока солнечного радиоизлучения в диапазоне  $\sim 150$  МГц (Рис. 11). Сравнение полученных данных с данными радиогелиографа Nancay работающем на частоте 150.9 МГц показывает, что полученный результат не является артефактом. Ранее изучение подобных событий проводилось в Nancay [10], [11] и Culgooga [12].



**Рис. 11. Квазипериодические вариации потока солнечного радиоизлучения в диапазоне  $\sim 150$  МГц. Время наблюдения май-сентябрь 2011.**

Проведённое сравнение характеристик Солнца и ионосферы Земли, получаемых на ИРНР с величинами получаемыми традиционными установками, говорит о том, что после незначительных доработок радар может быть использован в качестве инструмента способного предоставить дополнительную полезную информацию о процессах, происходящих в земной ионосфере и на Солнце.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки, гос. контракт № 16.518.11.7097

### Литература

1. *F. Honary, S. R. Marple, K. Barratt, P. Chapman, M. Grill, and E. Nielsen* Digital Beam-forming Imaging Riometer Systems. // Review of Scientific Instruments. Vol. 82(3) pp. 1-15. 22nd March 2011. Invited article.
2. *V. G. Bezrodny, B. Watkins, V. G. Galushko, K. Groves, A. S. Kashcheyev, O. V. Charkina, and Yu. M. Yampolski* Observation of Ionospheric Scintillations of Discrete Cosmic Sources with the Use of an Imaging Riometer. // Radio Physics and Radio Astronomy. Vol. 12(3) pp. 242-260. September 2007.
3. *Potekhin A. P., Medvedev A. V., Zavorin A. V., Kushnarev D. S., Lebedev V. P., and Shpynev B. G.* Development of Diagnostic Capabilities of the Irkutsk Incoherent Scattering Radar // Cosmic Research, 2008, Vol. 46, No. 4, pp. 347-353.
4. *P. Potekhin, A. V. Medvedev, A. V. Zavorin, D. S. Kushnarev, V. P. Lebedev, V. V. Lepetaev, and B. G. Shpynev* Recording and Control Digital Systems of the Irkutsk Incoherent Scatter Radar. // Geomagnetism and Aeronomy. Vol. 49(7) pp. 189–199 2009.
5. *Reinisch, B.W., Haines, D.M., Bibl, K., Galkin, I., Huang, X., Kitrosser, D.F., Sales, G.S., Scali, J.L.* Ionospheric sounding support of OTH radar. // Radio Science Vol. 32(4) pp. 1681-1694. 1997.
6. *A.V. Oinats, G.V. Kotovich and K.G. Ratovsky.* Comparison of the Main Ionospheric Characteristics Measured by the Digisonde at Irkutsk in 2003 with IRI 2001 Model Data. // Advances in Space Research. Vol. 37, Issue 5, pp. 1018-1022, 2006.
7. *Reinisch, B.W., Galkin I. A., Khmyrov G., Kozlov, A., Kitrosser D.F.* Automated collection and dissemination of ionospheric data from the digisonde network. // Advanced Radio Science Vol. 2 pp. 241-247. 2004.
8. *G.G. Bowman, L.A. Hajkovicz.* Small-scale ionospheric structures associated with midlatitude spread-F. // J. atmos. terr. Phys. Vol. 53, No. 5, pp. 447-457, 1991.
9. *Crane, R.K.* Ionospheric scintillation. // Proc. IEEE. Vol. 65(2). pp 180-199. 1977
10. *F. Axisa, Y. Avignon, M. J. Martres, M. Pick, P. Simon* Solar coronal streamers observed at 169 MHz with Nancy east-west radioheliograph. // Solar Physics. Vol. 19(1) pp. 110-127. 1971
11. *P. Lantos and C.E. Alissandrakis* Analysis of coronal emissions observed at meter wavelengths. // Astron. Astrophys. Vol. 351(1) pp. 373-381. November 1999.
12. *G. A. Dulk and K. V. Seridan* The structure of the middle corona from observations at 80 and 160 MHz. // Vol. 36(1) pp. 191-202. 1974