

И. В. Тютин¹, В. Б. Оводенко¹, С. А. Пушай¹¹ОАО «НПК «НИИДАР»»

ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО НАБЛЮДЕНИЮ РАДИОАВРОРЫ НА РЛС ДАЛЬНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ

В статье производится анализ экспериментальных данных по авроральным радиоотражениям, полученных на радаре метрового диапазона. Исследуется связь между обнаружением радиоаврооры и геомагнитной обстановкой в зоне ответственности радара.

Ключевые слова: РЛС, ракурсная чувствительность, авроральные помехи, ионосферные неоднородности, ракурсное рассеяние радиоволн.

Введение

Радиолокационные станции (РЛС) УКВ- и КВ-диапазонов с северной ориентацией зоны обзора периодически регистрируют помеховые сигналы, вызванные рассеянием радиоволн на ионосферных неоднородностях [1, 2]. Как показал анализ литературных данных, рассеянный сигнал приходит с дальностей 500—1000 км. Принято считать, что причиной появления авроральных неоднородностей являются плазменные неустойчивости Фарлей—Бунемановского и дрейфового типа. Особенностью авроральных неоднородностей является их вытянутость вдоль силовых линий магнитного поля [3]. Продольные размеры неоднородностей в 10—20 раз больше поперечных. Из-за вытянутости неоднородностей вдоль силовых линий интенсивность рассеяния максимальна при угле между лучом радара и линией магнитного поля близком к 0 градусам. Этот угол называется ракурсным. Локусом называют изолинии ракурсного угла. Поэтому такое обратное рассеяние радиоволн от ионосферных неоднородностей называют ракурсным рассеянием радиоволн (PPP). PPP часто встречается в полярной ионосфере в слое E на высотах от 90 до 120 км [4]. Наиболее вероятное время обнаружения рассеянного сигнала — с 20 до 8 часов местного времени [5].

Экспериментальным исследованиям радиоаврооры в УКВ- и КВ-диапазонах посвящено значительное количество работ [1, 2, 4, 6]. Однако экспериментальные данные по радиоаврооры, полученные на РЛС со сканированием ДН по азимуту в секторе 60°, в литературе практически не рассматривались и поэтому представляют определенный интерес.

В статье проводится анализ данных по регистрации радиоаврооры, полученных на радаре метрового диапазона волн (частота 150 МГц) с точкой стояния

в районе г. Мурманск. Станция имеет два сектора обзора: С-1 и С-2 (рисунок 1). Для данного сектора обзора рассчитаны локусы на основе модели геомагнитного поля IGRF.

В статье также рассматриваются экспериментальные данные по радиоаврооры, полученные на станции «Даугава» в 1978 году. Данная станция имеет сектор обзора по азимуту, совпадающий с сектором обзора радара метрового диапазона. Ракурсные условия для 1978 и 2014 годов отличаются незначительно: разница ракурсных углов в секторе обзора составляет менее 0,8°.

Описание экспериментальных данных и методика обработки

Экспериментальные данные представляют собой помеховые отметки в плоскости азимут-дальность с привязкой по времени. Оператор станции визуально выделял области помеховых радиоотра-

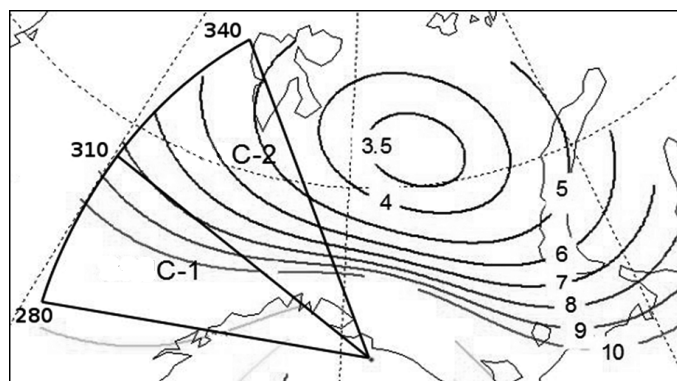


Рисунок 1. Секторы обзора С-1 и С-2 радара метрового диапазона волн, изолинии ракурсных углов, рассчитанные на основе модели IGRF для 2014 года

жений и фиксировал параметры: протяженность по азимуту и по дальности, время существования. На рисунке 2 схематично изображена регистрация обратного рассеяния от ионосферных неоднородностей в плоскости азимут-дальность секторов обзора С-1 и С-2.

Экспериментальные данные за январь, февраль, март 2014 года, зарегистрированные оператором, были обработаны следующим образом:

1) Было построено суточное распределение числа регистрируемых событий (рисунок 3).

2) Было получено распределение событий (помеховых радиоотражений) по дальности (рисунок 4).

3) Было получено количество зарегистрированных радиоотражений (событий) по азимуту (рисунок 5).

4) Оценивалась также площадь (S) помеховых радиоотражений. Площадь радиоотражений S рассчитывалась как произведение протяженностей по азимуту и дальности:

$$S = dAzim \times dR, \quad (1)$$

где $dAzim$ — протяженность авроральной помехи по азимуту, dR — протяженность авроральной помехи по дальности.

5) Оценивалась также эффективная интенсивность (I) регистрируемых радиоотражений. Эффективная

интенсивность радиоотражений I считается как произведение площади на длительность существования области радиоотражений:

$$I = S \times dt, \quad (2)$$

где dt — время, в течение которого фиксировалось событие.

Производилось сопоставление суточных вариаций индекса АЕ с распределениями площади и эффективной интенсивности помехи, регистрируемой в это время радаром. Под геомагнитным возмущением принимался факт превышения индекса АЕ значения в 500 нТл. Таким методом оценивалась связь между геомагнитным событием в авроральной области и регистрацией радиоавроры.

Данные за 30 мая 2005 года содержат все отметки за каждый такт обзора радара. Каждой такой отметке соответствует значение дальности, азимута. Такое представление данных позволило анализировать эволюцию параметров области PPP во времени. Анализ данных за 30 мая 2005 года производился по следующей схеме:

1) Были разбиты данные по времени на 15-минутные интервалы накопления. Каждый такой интервал накопления содержит все отметки, зарегистрированные радаром за 15 минут наблюдения.

2) Была проведена визуальная классификация областей PPP и определены их параметры.

3) Было произведено сопоставление параметров PPP с индексом авроральной активности.

Анализ данных

Интенсивность рассеянного сигнала тем больше, чем меньше ракурсный угол отличается от нуля [5]. На рисунке 1 изображены локусы в секторе обзора радара. В секторе обзора С-2 ракурсные углы изменяются от $4,5^\circ$ до 8° и от 8° до 10° для сектора С-1. Таким образом, по прогнозу (по расчету), помеховые условия для сектора С-1 являются более благоприятными.

Анализ данных за январь, февраль и март 2014 года

На рисунке 3 представлено суточное распределение числа регистрируемых PPP за январь, февраль и март 2014 года. Видно, что события регистрировались преимущественно в ночные и утренние часы с минимумом около полудня. В суточном ходе наблюдается утренний максимум в 7 часов по местному времени. Такой суточный ход согласуется с пространственно-временной изменчивостью авроральной области: в дневные часы область, занимаемая авроральным овалом, в несколько раз меньше, чем в ночные часы [3].

На рисунке 4 изображено распределение дальностей обнаружения радиоавроры за январь, февраль и март 2014 года. Наклонная дальность 75% из всех зарегистрированных помех за 3 месяца находится

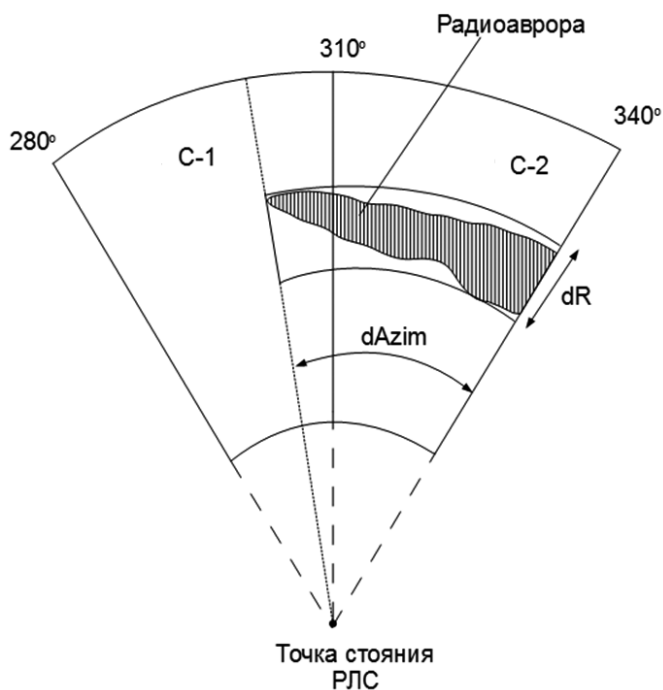


Рисунок 2. Схематичное изображение регистрации обратного рассеяния от ионосферных неоднородностей в плоскости азимут-дальность секторов обзора С-1 и С-2: dR — регистрируемая протяженность радиоавроры по дальности; $dAzim$ — регистрируемая протяженность радиоавроры по азимуту

в интервале от 500 до 1000 км. Это согласуется с более ранними экспериментальными данным, изложенными в [1, 2, 3].

На рисунке 5 представлено азимутальное распределение количества зарегистрированных событий за январь, февраль и март 2014 года. Распределение количества регистраций радиоавроры от азимута показывает, что чаще всего радиоаврора наблюдается на азимутах 310—340 град., что соответствует сектору С-2. Это связано с ракурсной чувствительностью радиоавроры, т.е. вероятность регистрации радиоавроры больше в области с меньшими ракурсными углами.

На рисунке 6 представлены результаты обработки экспериментальных данных по наблюдению авроральной помехи на станции «Даугава» на различных дальностях и углах места в каждом такте зондирования при обзоре в азимутальном секторе от 280 до 340 град. Запись производилась в каналах «веса» двух приемных лучей, направленных на 5.5 и 13.5 градусов по углу места в режиме обзора.

Пунктирными линиями на рисунке 6 обозначены результаты моделирования. Анализ полученных измерений проводился на соответствие хода изменения по азимуту интенсивности сигналов PPP с их ожидаемым изменением в соответствии с ракурсными углами в главном луче диаграммы направленности антенны (ГЛ ДНА). В секторе 310—340 град. ход уменьшения интенсивности АП по азимуту соответствовал изменению ракурсных условий в данном азимутальном секторе. В азимутальном секторе 280—310 град. интенсивность рассеянных сигналов практически не изменялась и в отличие от модельных расчетов к левому краю сектора обзора достигала 10—12 дБ. Таким образом, PPP на азимутах 280—300 град. определяется радиоотражениями, принимаемыми по дальним азимутальным боковым лепесткам из области, находящейся вне сектора обзора на азимутах 340—360 град.

В течение исследуемого промежутка (январь, февраль, март 2014 года) наблюдался ряд геомагнитных событий, совпадающих по времени с регистрацией помехи на радаре. На рисунках 7—10 представлены графики, иллюстрирующие такие события 7 и 8 января 2014 года. Пиковые значения АЕ-индекса наблюдаются на 1 час раньше, чем максимумы эффективной интенсивности и площади регистрируемых сигналов от неоднородностей.

14 января 2014 наблюдалась сильная суббуря, АЕ-индекс достигал значения 1500 нТл. Спустя примерно час на радаре были зарегистрированы события с большой площадью и эффективной интенсивностью: в течение часа помеха заполнила весь сектор С-2.

Анализ данных за 30 мая 2005 года

Сильная геомагнитная буря 30 мая 2005 года вызвала существенное увеличение области активных

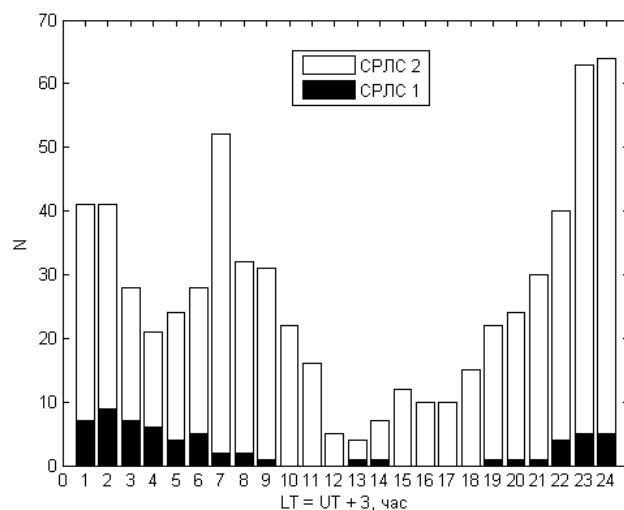


Рисунок 3. Суточное распределение числа регистрируемых событий за январь, февраль и март 2014 года (черным цветом показаны события в зоне С-1, белым — в С-2)

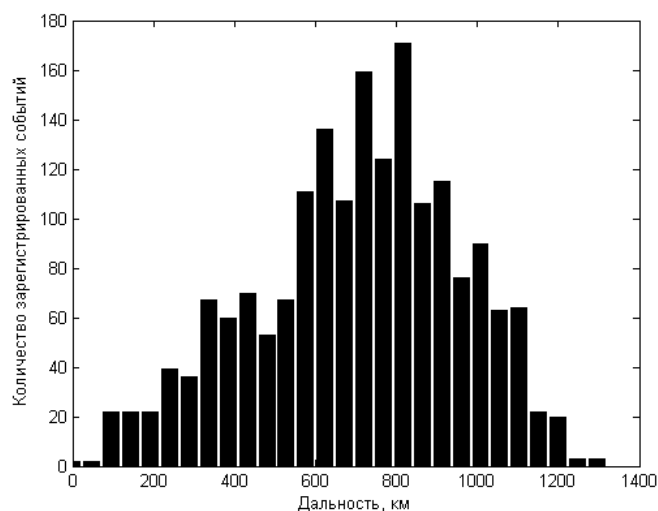


Рисунок 4. Распределение дальностей обнаружения радиоавроры за январь, февраль и март 2014 года

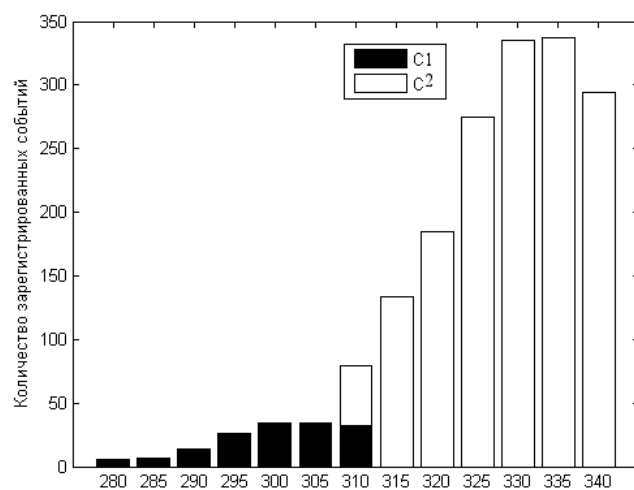


Рисунок 5. Азимутальное распределение количества зарегистрированных событий за январь, февраль, март 2014 года (черным цветом показаны события в зоне С-1, белым — в С-2)

полярных сияний. Радар в это время фиксировал PPP на всех азимутальных направлениях в секторе обзора. Анализ распределения помеховых и целевых отметок по дальности и азимуту позволяет детально рассмотреть эволюцию области PPP в зоне действия радара и проанализировать ее связь с индексом авроральной активности.

На рисунке 11 представлена суточная диаграмма индексов авроральной активности для 30 мая 2005 года. В интервале времени от 03:00 до 07:00 LT происходила вариация индекса AE с амплитудой больше 500 нТл. С 07:00 до 09:00 наблюдалось плато с амплитудными значениями AE, близкими к 0 нТл. С 10:00 фиксировалась серия суббурь и индекс AE варьируется с амплитудой, превышающей 2000 нТл.

По данным за 15-минутные интервалы накопления строились отметки на плоскости азимут — дальность. Области PPP определялись как скопления отметок на дальностях от 500 до 1000 км.

На рисунке 12 представлены данные, накопленные за 15-минутный интервал с началом в 04:00 LT. Регистрируется радиоаврора, имеющая протяженность по азимуту 15°. Индекс AE в это время превышает 500 нТл. На рисунке 13 представлены данные, накопленные за 15 минутный интервал с 05:00. Радиоаврора не регистрируется. Индекс AE в это время близок к 0 нТл. На рисунке 14 представлены данные, накопленные за 15-минутный интервал с 06:00. Радиоаврора регистрируется на всех азимутальных направлениях. Индекс AE в это время превышает 2000 нТл.

Выводы

- 1) Минимум регистрации радиоавроры наблюдается в дневное время: с 12 до 14 часов LT. Имеются два максимума: полуденный и утренний в 7 часов LT.
- 2) Наклонная дальность в 75% случаев из всех зарегистрированных помех находится в интервале от 500 до 1000 км. Средняя дальность регистрации рассеянного сигнала равна 750 км.
- 3) В 64% случаев в течение часа после регистрации пикового значения AE-индекса на дисплее радара фиксировалась авроральная помеха. В периоды бури (28—31 мая 2005 года) вероятность регистрации PPP, их площадь и интенсивность возрастают. Событие 30 мая 2005 года наглядно демонстрирует связь регистрации PPP с геомагнитной активностью.
- 4) Целесообразно продолжить сбор и анализ данных по радиоавроре на радиолокационной станции дальнего обнаружения с целью выявления эмпирической связи области и параметров PPP в зоне ответственности РЛС с геомагнитной активностью. Эти данные целесообразно также использовать при калибровке модели помеховых отражений [7, 8] от авроральных неоднородностей.

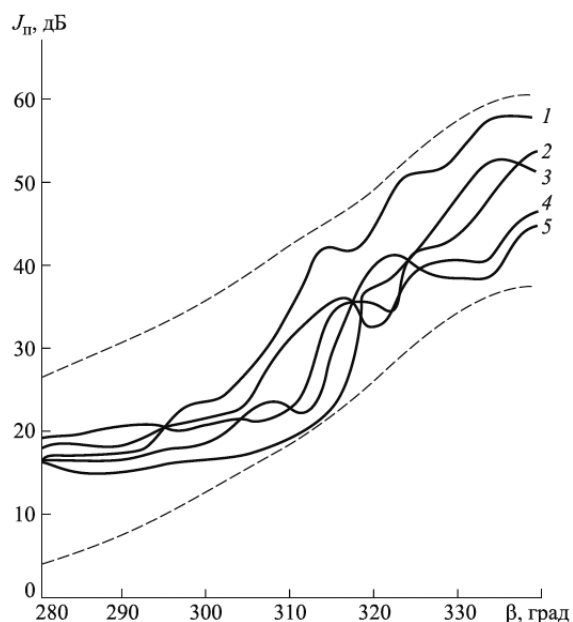


Рисунок 6. Экспериментальные зависимости интенсивности помех от азимута (пунктирные линии показывают модельные расчеты интенсивности для максимальных и минимальных значений удельной ЭПР для дальности 750 км; линии 2, 3, 4 — $\epsilon_{\text{цв}}=5,5^\circ$, $R=800, 600, 650$ км; линии 1 и 5 — $\epsilon_{\text{цв}}=13,5^\circ$, $R = 500$ км)

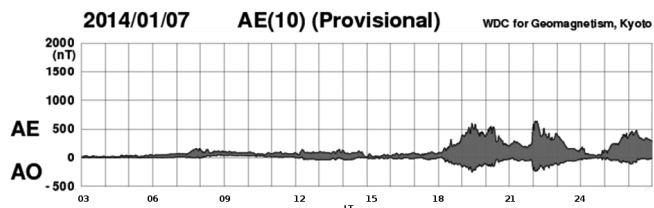


Рисунок 7. Суточные вариации авроральных индексов AE, AO по данным World Data Center for Geomagnetism, Kyoto за 7 января 2014 года

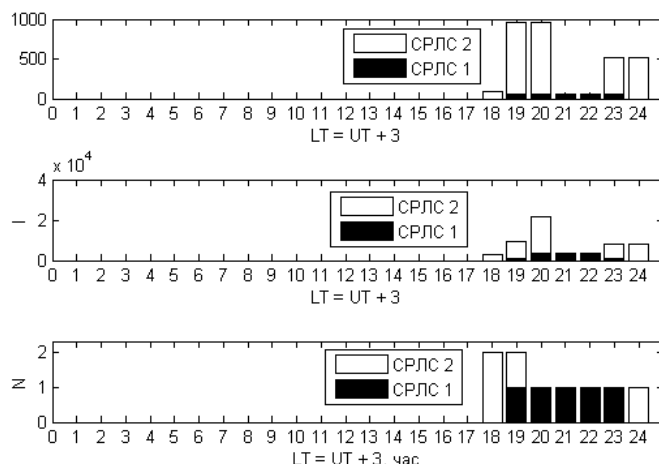


Рисунок 8. Распределение площади, эффективной интенсивности и числа регистрируемых радиоотражений в течение часа за 7 января (черным цветом показаны события в зоне C-1, белым — в C-2)

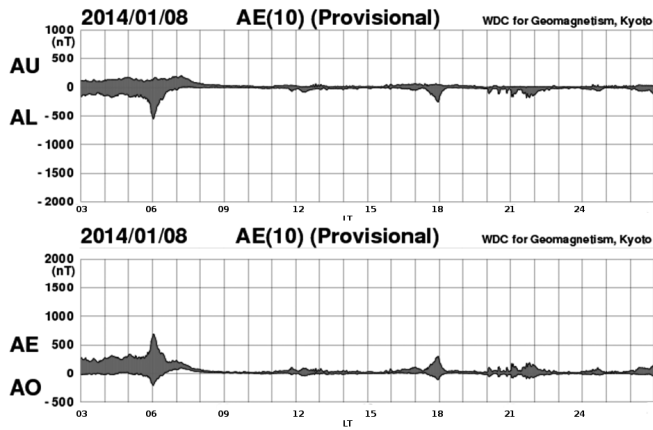


Рисунок 9. Суточные вариации авроральных индексов AE, AO по данным World Data Center for Geomagnetism, Kyoto за 8 января 2014 года

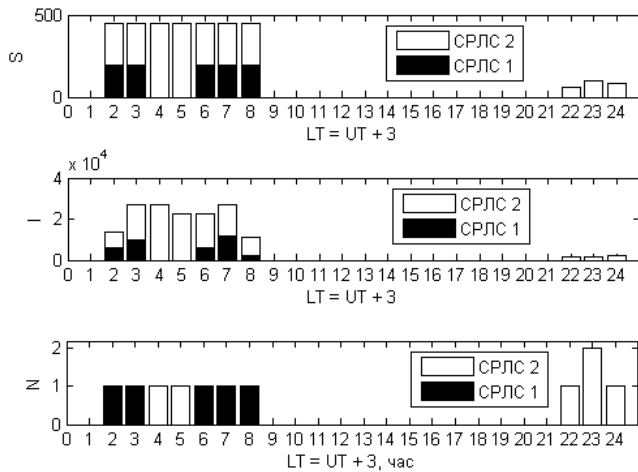


Рисунок 10. Распределение площади, эффективной интенсивности и числа регистрируемых радиоотражений в течение часа за 8 января 2014 года (черным цветом показаны события в зоне C1, белым — в C2)

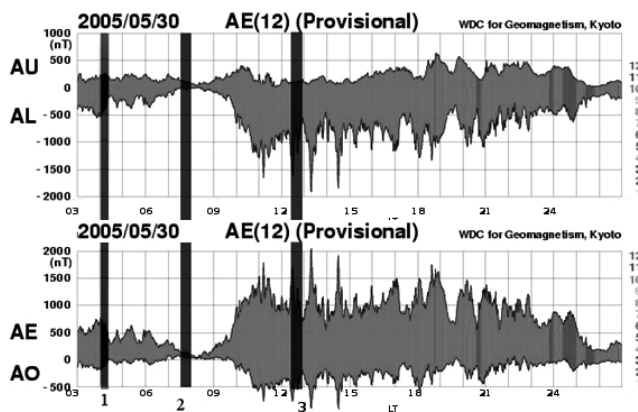


Рисунок 11. Суточные вариации индексов AE, AO по данным World Data Center for Geomagnetism, Kyoto за 30 мая 2005 года (темными вертикальными полосами с номерами 1, 2, 3 выделены области для 30 мая 2005 года)

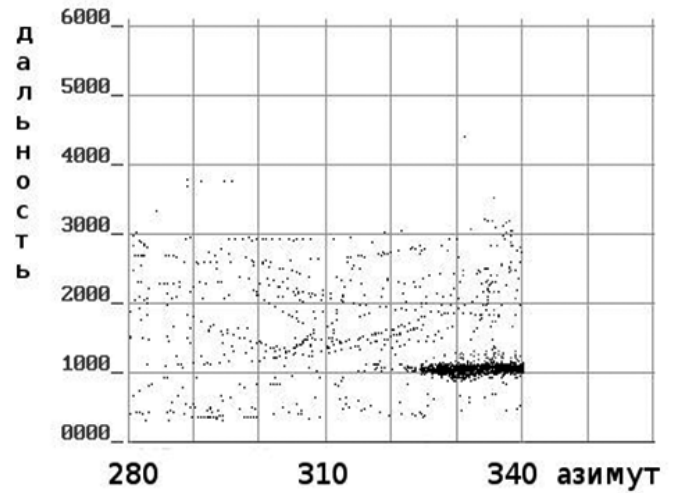


Рисунок 12. Отметки на плоскости азимут — дальность для участка № 1 на рисунке 11

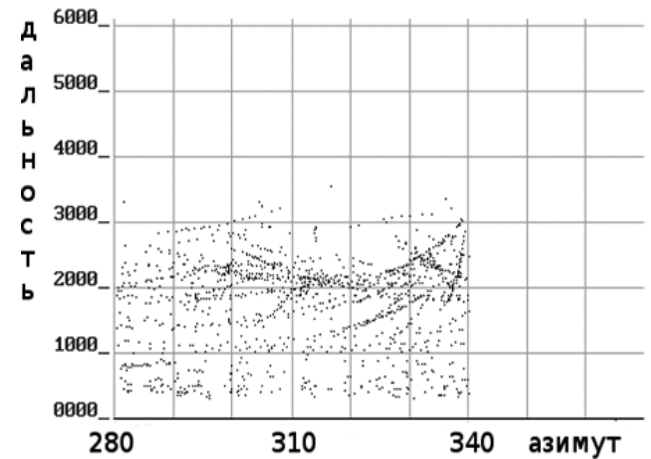


Рисунок 13. Отметки на плоскости азимут — дальность для участка № 2 на рисунке 11

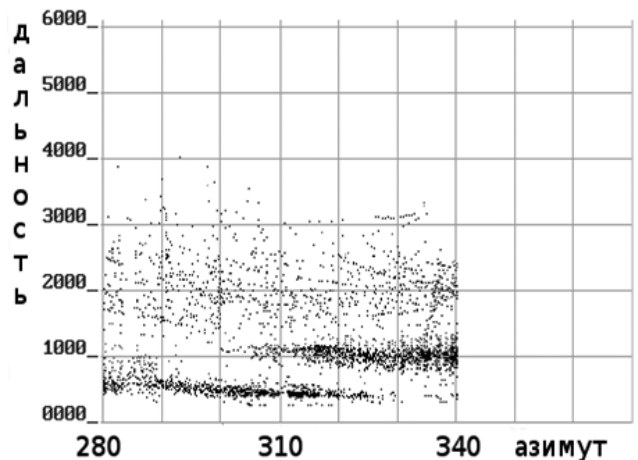


Рисунок 14. Отметки на плоскости азимут — дальность для участка № 3 на рисунке 11

ЛИТЕРАТУРА

1. Unwin R. S., Knox F. B. The morphology of the VHF radio aurora at sunspot maximum. — IV. Theory. — *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1968, v. 30, N1, p. 25—46.
2. Uspensky M. V., Janhunen P., Koustov A. V. and Kauristie K. Volume cross section of auroral radar backscatter and RMS plasma fluctuations inferred from coherent and incoherent scatter data: a response on backscatter volume parameters // *Ann. Geophys.*, 2011, 29, 1081—1092.
3. Успенский М. В., Старков Г. В. Полярные сияния и рассеяние радиоволн. — Л.: Наука, Ленингр. отд-ние, 1987.
4. Fejer B. G., Kelley M. C. Ionospheric irregularities // *Rev. Geophys. and Space Phys.*, 1980, Vol. 18., P. 401—454.
5. Свердлов Ю. Л. Морфология радиоавроры. — Л.: Наука, 1982.
6. Schlegel K. Coherent backscatter from ionospheric E-region plasma irregularities // *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1996, v. 58, p. 933—941.
7. Бондаренко А. П., Оводенко В. Б., Пушай С. А., Трекин В. В. Подход к расчету параметров авроральных радиоотражений для РЛС диапазона УКВ // РТИ Системы ВКО-2014: сб-к матер. II Всероссийской научно-технической конференции. — М.: Радиотехника, С. 199—206.
8. Тютин И. В., Оводенко В. Б., Пушай С. А. Модель сигнала, отраженного от авроральных неоднородностей слоя E, для надгоризонтной РЛС дальнего обнаружения УКВ-диапазона // *Physics of Auroral Phenomena, Proc. XXXVIII Annual Seminar, Apatity*, 2015.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Тютин Илья Валерьевич, инженер 2 категории НТЦ-2 ОАО «НПК «НИИДАР»», Москва, Улица 8 Марта, дом 10, строение 5, тел. 4952320006, доб. 43—52, e-mail: tyutin@physics.msu.ru.

Оводенко Владимир Борисович, зав. лаборатории НТЦ-2 ОАО «НПК «НИИДАР»», Москва, 8 Марта ул, дом 10, строение 5, тел. 84952320006, доб. 43—52, e-mail: ovodenko@gmail.com.

Пушай Станислав Анатольевич, главный специалист НТЦ-2 ОАО «НПК «НИИДАР»», Москва, 8 Марта ул, дом 10, строение 5, тел.: 84952320006, доб. 43—52, e-mail: pushay.sa@gmail.com.

For citation: *Radiopromyshlennost.* — 2016. — № 1. — P. 44—49.
УДК 621.396.96

I. V. Tyutin, V. B. Ovodenko, S. A. Pushay

PROCESSING AND ANALYSIS OF THE AURORAL BACKSCATTER OBSERVATIONS WITH EARLY WARNING RADAR

In this paper authors analyze the experimental data on the registration of auroral radio reflections on geophysical radar VHF. The relationship between the geomagnetic conditions and detected auroral backscatter in the zone of responsibility of radar.

Keywords: radar, aspect sensitivity, auroral clutter, ionospheric irregularities, backscatter.

REFERENCES

1. Unwin R. S., Knox F. B. The morphology of the VHF radio aurora at sunspot maximum // IV. Theory. — *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1968, v. 30, N1, p. 25—46.
2. Uspensky M. V., Janhunen P., Koustov A. V. and Kauristie K. Volume cross section of auroral radar backscatter and RMS plasma fluctuations inferred from coherent and incoherent scatter data: a response on backscatter volume parameters // *Ann. Geophys.*, 29, 1081—1092, 2011.
3. Uspenskii M. V. i Starkov G. V. Polyarnye siyaniya i rasseyaniye radiovoln. — L.: Nauka. Leningr. otd-nie, 1987.
4. Fejer B. G., Kelley M. C. Ionospheric irregularities // *Rev. Geophys. and Space Phys.*, 1980, Vol. 18., P. 401—454.
5. Sverdlov Yu. L. Morfologiya radioavrory. — L.: Nauka, 1982.
6. Schlegel K. Coherent backscatter from ionospheric E-region plasma irregularities. — *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1996, v. 58, p. 933—941.
7. Bondarenko A. P., Ovodenko V. B., Pushay S. A., Trekin V. V. Podkhod k raschetu parametrov avroral'nykh radiootrazhenii dlya RLS diapazona UKV // *RTI Sistemy VKO-2014: sbornik materialov II Vserossiiskoy nauchno-tekhnicheskoi konferentsii.* — М.: Radiotekhnika, s. 199—206.
8. Tyutin I. V., Ovodenko V. B., Pushay S. A. Model' signala, otrazhennogo ot avroral'nykh neodnorodnostei sloya E, dlya nadgorizontnoi RLS dal'nego obnaruzheniya UKV diapazona. — *Physics of Auroral Phenomena, Proc. XXXVIII Annual Seminar, Apatity*, 2015.

AUTHORS

Tyutin Ilya, engineer of th 2nd category, JSC «Distant Radiocommunication Scientific Research Institute», tel.: 0079852790453; 0074952320006, e-mail: tyutin@physics.msu.ru.

Ovodenko Vladimir, head of Laboratory, JSC «Distant Radiocommunication Scientific Research Institute», tel.: 0074952320006, e-mail: ovodenko@gmail.com.

Pushay Stanislav, chief specialist, JSC «Distant Radiocommunication Scientific Research Institute», tel.: 0074952320006, e-mail: pushay.sa@gmail.com.