

НАБЛЮДЕНИЕ РАДИОАВРОРЫ НА РЛС МЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНОЙ БУРИ 30 МАЯ 2005 ГОДА ИЗ ОБЛАСТИ С БОЛЬШИМИ РАКУРСНЫМИ УГЛАМИ

И.В. Тютин, В.Б. Оводенко, С.А. Пушай

ОАО НПК НИИДАР, г. Москва, Россия
e-mail: tyutin@physics.msu.ru

Аннотация. В работе приведен анализ радарных отметок, зарегистрированных на РЛС ДО метрового диапазона. Сильная геомагнитная буря 30 Мая 2005 года вызвала существенное увеличение области выпадения заряженных частиц. Радар в это время фиксировал ракурсное рассеяние радиоволн (PPP) на всех азимутальных направлениях в секторе обзора. Сигналы обратного рассеяния регистрировались из областей с ракурсными углами порядка 16° .

Введение

Изучению ракурсного рассеяния радиоволн на ионосферных неоднородностях посвящено множество исследований [1-3]. Согласно наблюдениям [1, 2] радиоаврора окантовывает полярную и экваториальную границы овала полярных сияний. Выделяют несколько типов PPP, среди которых есть диффузные (занимают азимутальные секторы до нескольких десятков градусов и не имеют четких границ) и дискретные (имеют четкие границы и протяженность по азимуту порядка нескольких градусов). Существование неустойчивостей (Фарлей-Бунимановских и дрейфовых [1]) приводит к формированию неоднородностей плазмы E слоя ионосферы. Данные неустойчивости имеют пороговый характер. Для формирования неоднородностей необходимо превышение ионосферного электрического поля некоторого порогового значения, зависящего от концентрации электронов. При этом при увеличении концентрации электронов для образования неоднородностей потребуется наличие более сильного электрического поля [3]. Сигнал от радиоавроры приходит с дальностей 500 - 1200 км. Рассеивающие неоднородности вытянуты вдоль магнитных силовых линий и располагаются в слое E на высотах 100 - 120 км [3]. Следствием магнитоориентированности является зависимость мощности сигнала радиоавроры от ракурсного угла. Ракурсным углом называют угол между плоскостью, перпендикулярной магнитной силовой линии и волновым вектором набегающей волны. Изолинии ракурсных углов называют локусами. Наиболее мощный сигнал от радиоавроры регистрируется в направлении с минимальным ракурсным углом. Экспериментальные исследования [4, 5] дают оценки зависимости ослабления мощности сигнала от ракурсного угла на уровне 10.5 дБ/град при ракурсном угле меньше 3° и 5 дБ/град при больших углах.

Экспериментальным исследованиям радиоавроры в УКВ и КВ диапазонах посвящено значительное количество работ [1-3, 6]. Однако экспериментальные данные по радиоавроре, полученные на радарх в режиме сканирования по азимуту, в литературе практически не рассматривались и поэтому представляют определенный интерес.

Экспериментальные данные

В работе производится анализ экспериментальных данных по регистрации радиоавроры, полученных на радаре метрового диапазона волн (частота 150 МГц). Радар расположен на Кольском полуострове. Станция имеет два сектора обзора: С-1 и С-2, которые обозначены на рис. 1. В секторе обзора радара рассчитаны ракурсные углы на высоте 110 км по модели IGRF для 2005 года (рис. 1). Минимальный угол составляет 4.5° , а максимальный достигает значения 16° . Диаграмма направленности (ДН) рассматриваемого радара на прием широкая – составляет 10° (по уровню -3дБ), что позволяет принимать сигналы по азимуту из области с меньшими ракурсными углами. При этом ослабление сигнала за счет ДН будет сопоставимо с ослаблением за счет ракурсной чувствительности и позволит регистрировать радиоаврору приемной ДН, направленной на азимут 340° , с азимутального направления 350° (радиоаврора на азимуте 340° может отсутствовать). Стоит отметить, что в такой ситуации полученным отметкам будет присвоено азимутальное направление приемной ДН.

Экспериментальные данные представляют собой помеховые и целевые отметки в плоскости азимут-дальность с привязкой по времени. На плоскости азимут-дальность строились отметки, зарегистрированные за 15 минутные интервалы накопления. Области PPP определялись как скопления отметок на дальностях от 500 км до 1200 км, что соответствует диапазону высот 100 – 120 км при углах места порядка 3° . Мощность принятого сигнала по имеющимся данным точно определить не представляется возможным. Однако отношение сигнал-шум всех зарегистрированных отметок выше порога 15 дБ.

Сильная геомагнитная буря 30 Мая 2005 года вызвала существенное увеличение области активных 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 индексами авроральной активности. На рис. 2а представлена суточная диаграмма индексов авроральной активности для 30 Мая 2005 года. В течение суток индекс Dst достигал значения -100нТл, а индекс авроральной активности AE превышал 2000 нТл. Сутки были разбиты на три временных интервала, исходя из характера наблюдаемой радиоавроры.

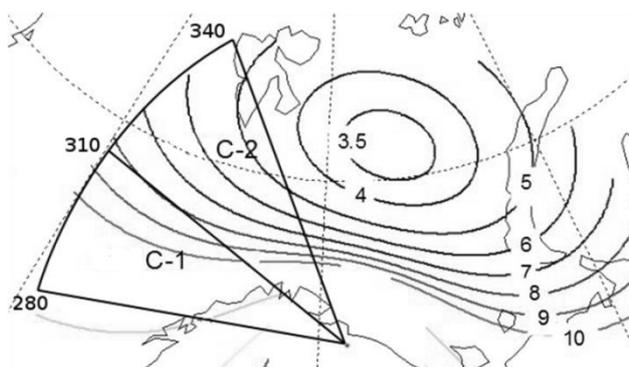


Рисунок 1. Секторы обзора C-1 и C-2 радара метрового диапазона волн; изолинии ракурсных углов, рассчитанные на основе модели IGRF для 2005 года

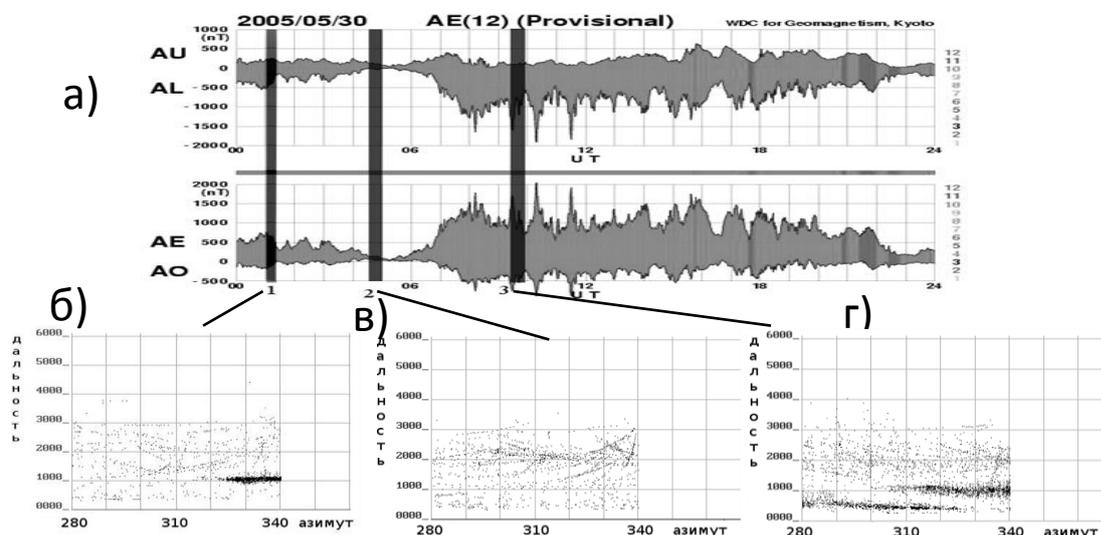


Рисунок 2. а - суточные вариации индексов AE, AO по данным World Data Center for Geomagnetism, Kyoto за 30 мая 2005 года; б, в, г - отметки на плоскости азимут-дальность для периодов накопления №1, 2 и 3 соответственно.

1) В интервале времени от 00:00 до 04:00 UT значение индекса AE было в диапазоне от 300 до 500 нТл. На рис. 2б представлены данные, накопленные за 15 минутный интервал с началом в 04:00 UT. Такая картина регистрации отметок характерна для данного временного интервала. Регистрируется радиоаврора, имеющая протяженность по азимуту до 15° в секторе обзора C-2. Сигнал принимается с дальностями порядка 1000 км. Ракурсные условия для области, занятой радиоавророй составляют от 4.5° до 6°, что дает ослабление мощности принятого сигнала (согласно оценкам [4, 5]) от 31.5 до 46.5 дБ.

2) С 04:00 до 07:00 UT спокойный период с вариациями значений AE близкими к 0 нТл. В этот временной промежуток радиоаврора не регистрируется. На рис. 2в изображены типичные для данного временного интервала данные, регистрируемые радаром.

3) С 07:00 индекс AE варьируются в диапазоне от 500 до 2000 нТл. Диффузные отражения регистрируются во всех азимутальных секторах (рис. 2г) в диапазоне дальностей от 500 до 1200 км. Периодически регистрируется дискретная радиоаврора на дальностях порядка 1000 км, заполняющая весь азимутальный сектор обзора. Регистрируются отражения из сектора C-1 при отсутствии радиоавроры в секторе C-2. Для азимута 280° ослабление мощности принимаемого сигнала согласно ракурсной чувствительности достигает значений в 91.5 дБ.

Анализ экспериментальных данных

Во время сильной геомагнитной бури 30 мая 2005 года с 07:00 UT радаром регистрировалось ракурсное рассеяние на всех азимутальных направлениях секторов обзоров C-1 и C-2. В секторе обзора C-1 ракурсные

углы на высоте 110 км и дальности 500 км достигают значений в 15-16°. Оптимальными для наблюдения радиоавороры считаются ракурсные углы 3°, что на 12° меньше, чем для сектора С-1. Такая разница ракурсных улов дает падение мощности принимаемого сигнала в 60 дБ.

Возможность регистрации ракурсного рассеяния радаром определяется отношением мощности рассеянного сигнала от радиоавороры к мощности шума (ОПШ или CNR). Таким образом, цель будет обнаружена при превышении ОПШ некоторого порогового значения (порога обнаружения). Величина порога обнаружения выбирается такой, чтобы с необходимой вероятностью исключить ложную регистрацию. Отношение сигнал-шум одиночной цели можно оценить, воспользовавшись основным уравнением радиолокации (1):

$$CNR_{\varepsilon, \beta, R} = \frac{\Pi_0 \sigma R_0^3 c T}{2R^4} F_{изл}(\varepsilon, \beta) F_{пр}(\varepsilon, \beta) \chi(R), \quad (1)$$

где Π_0 - энергетический потенциал РЛС (отношение сигнал шум от цели на наклонной дальности 1000 км, с эффективной площадью рассеяния (ЭПР) 1 м² энергетический потенциал РЛС); σ - ЭПР; F - диаграмма направленности антенны на излучение или прием; χ - сечение функция неопределенности сигнала (ФНС) по дальности.

Особенностями регистрации радиоавороры являются: 1) обнаружение большого числа сигналов из протяженной области пространства по азимуту и дальности, преодолевших порог обнаружения; 2) ракурсная чувствительность. Из-за широкой диаграммы направленности и сканированию по азимуту область ракурсного рассеяния классифицируется как сложная распределенная цель. Для учета этих свойств используем понятие удельной объемной ЭПР и внесем поправку на ракурсный эффект:

$$\sigma(R, \varepsilon, \beta) = (\eta - \xi(R, \varepsilon, \beta)) dV, \quad (2)$$

где η - удельная ЭПР; $\xi(R, \varepsilon, \beta)$ - ракурсная чувствительность; dV - объем пространства, внутри которого считаются неизменными параметры радиоавороры.

Тогда формула для оценки отношения помеха-шум радиоавороры (CNR) примет вид (3):

$$CNR_{total} = \int_{V_{imp}} CNR(\varepsilon, \beta, R) \quad (3)$$

где V_{imp} - импульсный объем луча.

В работе [6] описано несколько механизмов, которые бы обеспечивали регистрацию радиоавороры при столь больших ракурсных углах (15-16°). Суть большинства механизмов заключается в изменении хода радиолуча из-за рефракции или эффекта линзирования на тонких слоях, что приводит к изменению эффективного ракурсного угла в области обратного рассеивания. Приведенные механизмы изменяют ракурсный угол на 3-4°.

Согласно исследованиям на радаре EISCAT [7], ракурсная чувствительность при ракурсных углах от 4° до 6° может ослабевать с 5 до 1 дБ/град.

Однако не только ракурсный эффект влияет на мощность наблюдаемой радиоавороры. ЭПР области ракурсного рассеяния зависит от удельной ЭПР рассеивающих неоднородностей (2). Согласно экспериментальным работам [8], удельная ЭПР может изменяться в пределах 20 дБ/м относительно наиболее вероятного значения.

Таким образом, при задействовании всех перечисленных выше механизмов ослабление мощности сигнала от радиоавороры составит 51 дБ. Это эквивалентно ослаблению мощности сигнала PPP при наиболее вероятной удельной ЭПР при ракурсных углах порядка 7°.

Мощность сигнала радиоавороры зависит от множества факторов: удельной ЭПР неоднородностей, зависящей от концентрации электронов и величины ионосферных токов; среды распространения (эффекты линзирования и рефракции изменяют направление распространения волны), ракурсной чувствительности.

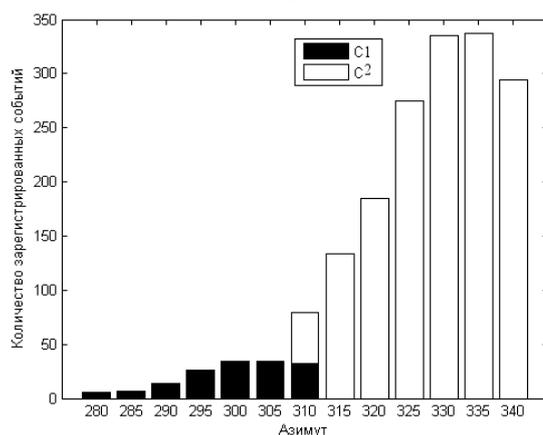


Рисунок 3. Азимутальное распределение количества зарегистрированных событий за январь, февраль, март 2014 года. Черным цветом показаны события в зоне С1, белым в С2

Заключение

В результате обработки экспериментальных данных по регистрации радиоавроры во время сильной геомагнитной бури 30 мая 2005 года были обнаружены сигналы из областей с ракурсными углами до 16° . Согласно представлениям о ракурсной чувствительности ослабление мощности сигнала в таком случае составляет порядка 91.5 дБ. Это свидетельствует об очень малой вероятности регистрации радиоавроры из этой области, что подтверждается экспериментальными данными с этого же радара в течение января, февраля и марта 2014 года (рис. 3).

Была произведена оценка, согласно которой ракурсная чувствительность могла быть нивелирована следующими факторами:

- изменение направления распространения радиоволн за счет эффектов линзирования и рефракции, которые могут приводить к изменениям реального ракурсного угла на $2-4^\circ$;
- увеличение удельной ЭПР рассеивающих неоднородностей на 20 дБ/м относительно наиболее вероятного значения [8];
- за счет широкой диаграммы направленности по азимуту возможны ошибки в определении азимутального направления, что может уменьшить ракурсное ослабление на 5-10 дБ.

Суммарный эффект описанных выше явлений может уменьшить ослабление принимаемого сигнала с 91.5 дБ до 41.5 дБ, что соответствует ослаблению из-за ракурсной чувствительности на локусах порядка 5° . Такие ракурсные условия соответствуют сектору обзора С-2, где согласно экспериментальным данным (рис. 3) радиоаврора наблюдается довольно часто.

Список литературы

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, N 1, p. 25-46.
2. Успенский М.В. и Старков Г.В. Полярные сияния и рассеяние радиоволн. - Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1987. УДК 550.388
3. 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.
4. Fejer B. G., Kelley M. C. Ionospheric irregularities. Rev. Geophys. and Space Phys. 1980. Vol. 18., P. 401-454.
5. Schlegel K. Coherent backscatter from ionospheric E-region plasma irregularities. - J. Atmos. Terr. Phys., 1996, v. 58, p. 933 - 941.
6. Moorcroft D. R. A statistical study of UHF auroral backscatter at large magnetic aspect angle: A reanalysis of unpublished result from 1968. - J. Geophys. Res., Vol. 101, P. 11,005-11,011, 1996.
7. Moorcroft D. R. and Schlegel K., Height and aspect sensitivity of large aspect angle coherent backscatter at 933 MHz, - J. Geophys. Res., Vol. 95, P. 19,011-19,021, 1990.
8. Ruohoniemi J. M., Moorcroft D. R. Radar auroral echo heights as seen by a 398-MHz phased array radar operated at Homer, Alaska. - Radio Science, Vol. 20, Num. 4, P. 719-734, 1985