

УДК520.874.3+550.388.2

## РАКУРСНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ СИГНАЛОВ СРЕДНЕШИРОТНОГО КОГЕРЕНТНОГО ЭХА ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ БУРИ 9–10 НОЯБРЯ 2004 г.

**К.В. Гркович, Б.Г. Шпынев, О.И. Бернгардт**

### ASPECT SENSITIVITY OF MID-LATITUDE COHERENT ECHOES DURING NOVEMBER 9–10, 2004 GEOMAGNETIC STORM

**K.V. Grkovich, B.G. Shpynev, O.I. Berngardt**

В работе рассматриваются данные эксперимента, проведенного на Иркутском радаре НР по исследованию частотно-ракурсной зависимости сигналов среднеширотного когерентного эха (КЭ). Для объяснения результатов эксперимента было проведено численное моделирование эксперимента на основе теоретической модели диаграммы направленности антенны в диапазоне углов, соответствующих нижним боковым лепесткам, и геомагнитного поля в области формирования сигналов КЭ. Выявлены пространственные области, соответствующие ракурсным условиям формирования КЭ, и проанализированы возможные механизмы формирования сигналов КЭ с разными свойствами.

In the present work the data of an experiment carried out on Irkutsk Incoherent Scatter Radar for investigation of aspect – frequency dependence of coherent echoes (CE) signals are investigated. For explanation of the experiment the numerical modeling based on of the theoretical antenna pattern for low side-lobes and geomagnetic field in the region of forming CE signals was made. Space areas corresponding to aspect sensitivity conditions for CE forming were revealed, and possible mechanisms of forming CE with different properties were discussed.

#### Введение

Важной частью физики ионосферной плазмы являются процессы возникновения и развития неустойчивостей. Эти неустойчивости генерируют неоднородности различных масштабов, которые оказывают сильное влияние на распространение и рассеяние радиоволн в ионосфере. Основным методом исследования этих неустойчивостей и связанных с ними мелко-масштабных неоднородностей является метод обратного рассеяния радиоволн. При этом в экспериментах наблюдаются сигналы мощного рассеяния в Е-слое (радиоаврора или когерентное эхо (КЭ)) на неоднородностях, вытянутых вдоль магнитного поля Земли. Когерентное эхо наблюдается в средних широтах на высотах Е-слоя ионосферы. Оно наблюдается во время больших геомагнитных возмущений [1] или при возникновении спорадических слоев, характеризующихся резкими градиентами электронной концентрации и/или появлением тяжелых металлических ионов [2], при которых создаются условия, необходимые для возникновения неустойчивостей данного типа (двух-поточкового и градиентно-дрейфового) [3]. Благодаря известной ракурсности процесса рассеяния на таких неоднородностях (наиболее мощное рассеяние наблюдается в случае, когда магнитное поле почти перпендикулярно лучу зрения [4, 5]) и вследствие геометрии эксперимента, на среднеширотном Иркутском радаре некогерентного рассеяния (НР) рассеяние может наблюдаться в достаточно большом диапазоне географических широт 58–62° с.ш. (рис. 1). При этом сигналы КЭ регистрируются боковыми лепестками диаграммы направленности антенны.

Механизмами генерации неоднородностей рассматриваемых масштабов в подавляющем большинстве случаев считаются двухпоточковая [4, 5] и градиентно-дрейфовая [6] неустойчивости.

Основным условием возникновения подобных неоднородностей является наличие сильного ион-электронного дрейфа со скоростями порядка или больше скорости ионного звука и/или высоких градиентов фоновой электронной концентрации. Источни-

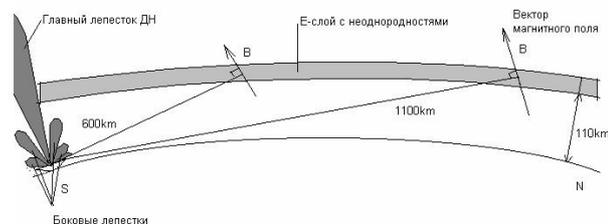


Рис. 1. Геометрия эксперимента.

ком создания таких условий во время сильных магнитных возмущений является западный электроджет.

#### Цель работы

В ноябре 2004 г. на Иркутском радаре НР проведен первый эксперимент по регистрации КЭ на слабо резонансных частотах, соответствующих смещению диаграммы направленности (ДН) в азимутальной плоскости менее чем на 1°. В географических координатах это соответствовало повороту главного лепестка ДН антенны в меридиональной плоскости С-Ю на ~0.44°, причем характерный угловой размер каждого лепестка диаграммы направленности в этой плоскости имеет полуширину также порядка ~0.5°. В результате получены неожиданные экспериментальные данные, показавшие сильную зависимость мощности принятого сигнала от частоты зондирования. Целью данной работы является исследование возможных причин такой зависимости на основе моделирования ДН Иркутского радара НР и известных теоретических моделей неоднородностей.

#### Эксперимент

Режим работы Иркутского радара НР [7] при исследовании КЭ в данном эксперименте включал циклическое изменение частоты зондирующего импульса в диапазоне от 159 МГц до 160.080 МГц с шагом 120 кГц. Данные зондирования на каждой частоте записывались в виде отдельных реализаций рассеянного сигнала с частотой следования зондиру-

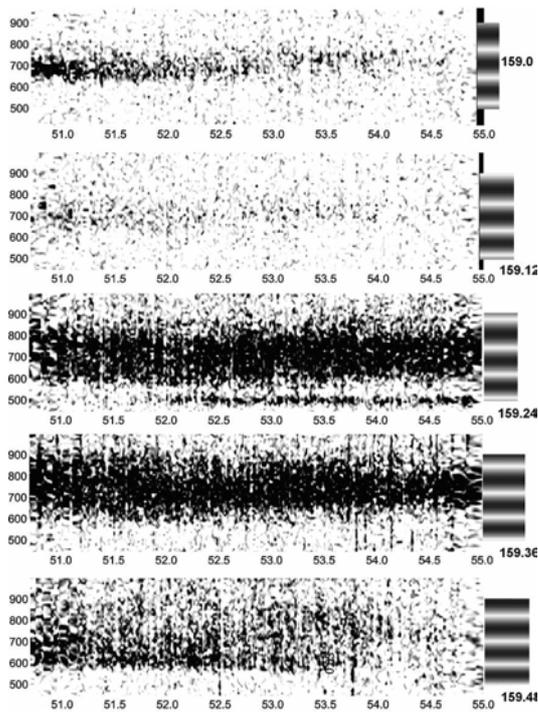


Рис. 2. Мощности сигналов КЭ.

ших импульсов 25 Гц и сохранением полной формы (квадратурных компонент как функций времени) принятого сигнала на каждой частоте в цифровом виде, что позволило провести их последующий раздельный анализ. Основным объектом исследования была мощность сигнала КЭ, рассчитанная для каждой реализации на каждой частоте в течение интервала наблюдений. На рис. 2 представлены мощности сигналов КЭ на каждой из частот зондирования с 08:50 до 08:55 10.11.2004. Темные области на диаграммах соответствуют сигналам КЭ. Анализ данных показал сильную зависимость мощности сигнала КЭ от изменения угла ДН, что не может быть объяснено просто геометрией эксперимента, которая ранее была рассчитана для области неоднородностей с учетом известных ракурсных условий зондирования [8]. Это противоречие послужило основной причиной проведения данного исследования.

### Моделирование

Хотя модель главного лепестка диаграммы направленности Иркутского радара НР была построена по данным зондирования звездных радиостанций и Луны [9], [10], однако в области нижних боковых лепестков ее проверка не проводилась, поэтому при анализе использовалась стандартная модельная форма ДН, рассчитанная для антенн подобного типа. В данной работе нами было выдвинуто два предположения:

- 1) наблюдаемая в эксперименте сильная зависимость профиля мощности от частоты зондирования связана с изменением формы диаграммы направленности;
- 2) зависимость мощности КЭ от дальности и времени связана с динамикой области генерации неоднородностей.

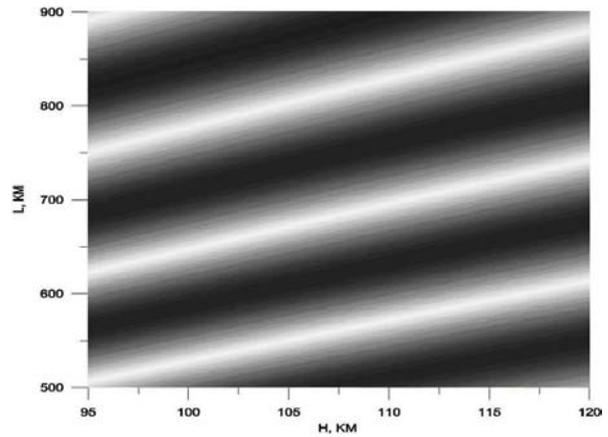


Рис. 3. Зависимость формы ДН от частоты.

Эти два фактора были исследованы при теоретических расчетах и численном моделировании.

В первом приближении считалось, что неоднородности сосредоточены в узком диапазоне высот вблизи ~100 км толщиной порядка нескольких километров, что не противоречит экспериментальным данным о подобных неоднородностях [11]. В рамках сферически-симметричной модели рассеивающего слоя была получена проекция интенсивности падающего поля на данный слой в области, где обычно наблюдаются КЭ (рис. 2, панели справа, на которых белому цвету соответствуют локальные минимумы, а черному цвету – локальные максимумы напряженности электрического поля ДН). Из сопоставления данной модели с экспериментальными данными видно, что для большинства частот наблюдается качественное согласие в положении максимумов КЭ и максимумов в ДН. Однако для некоторых случаев область КЭ либо не совпадает, либо перекрывает как локальные максимумы, так и локальные минимумы ДН. Было выдвинуто предположение, что наблюдаемые отличия могут быть вызваны изменением высоты рассеивающей области, которая может не только менять высоту, но иногда даже расщепляться на два независимых слоя [11] в области высот 95–120 км, а по широтному расположению данная область близка к зоне западного электроджета, в котором во время сильных магнитных бурь создаются необходимые условия для формирования рассматриваемых неоднородностей [11], [1].

Моделирование показало, что распределение мощности зондирующего сигнала вдоль слоя за счет формы ДН существенно меняется при изменении высоты области неустойчивостей от 95 до 120 км, что может приводить к полной потере сигналов КЭ даже при сравнительно малых изменениях направления главного лепестка ДН. На рис. 3 показаны модельные расчеты поля ДН для фиксированной частоты 159.00 МГц на предполагаемых высотах области неустойчивостей (95–120 км ось X) в зависимости от радиолокационной дальности (ось Y). Из рисунка видно, что при изменении высоты слоя на 15 км локальные минимумы и максимумы мощности сигнала меняются местами.

Очевидно, что в рамках данной модели один след будет наблюдаться в случае, когда широтная область генерации неоднородностей достаточно узка и имеет ширину порядка периода локальных

максимумов (около 100 км). В случае когда область генерации широкая, эффект полос за счет интегрирования по азимутальным направлениям будет сглаживаться.

Как возможное объяснение кажущегося группового сдвига области неоднородности (рис. 2), когда наблюдаемая дальность до области формирования КЭ меняется на ~50 км за 4 мин, может быть рассмотрено ее вертикальное перемещение. По предварительным оценкам, скорость вертикального перемещения области генерации КЭ порядка 40 м/с. Кроме того, резкий обрыв сигнала на ~53 мин (рис. 2) может соответствовать переходу области генерации неоднородностей в зону локального минимума ДН, не прекращению (судя по нижней панели рис. 2), а лишь выходу из области уверенного приема.

Таким образом, в соответствии с результатами проведенного моделирования, сопоставленными с экспериментальными данными, можно утверждать, что динамика КЭ по дальности может быть вызвана не только горизонтальным, но и вертикальным перемещением области формирования КЭ. Также, в рамках изложенных предположений, изменение ширины области регистрации может быть связано не только с изменением ширины области развития неоднородностей в направлении С-Ю, но и с изменением ее толщины по высоте: от минимальной (1–2 км), соответствующей рис. 2 (узкий след на дальности 500 км на третьей панели), до максимальной (10–20 км), соответствующей широкому следу на третьей панели рис. 2.

### Выводы

На основе экспериментальных данных по регистрации КЭ на Иркутском радаре НР в ноябре 2004 г., исследованы частотно-ракурсные особенности среднеширотных сигналов КЭ, полученных при малых изменениях углов наклона ДН антенны.

Установлено следующее:

1. Распределение поля ДН на высоте области генерации неустойчивостей является существенно неоднородным вследствие наличия боковых лепестков, что может приводить к формированию выделенных дальностей приема КЭ.

2. Дальность регистрации КЭ также зависит от истинной высоты и высотного распределения области неоднородностей. Чем больший диапазон высот занимает область генерации КЭ, тем более сигнал КЭ будет «размазан» по дальности.

3. Динамика КЭ по времени и дальности (кажущийся эффект группового перемещения) может быть вызвана не только горизонтальным, но и вертикальным перемещением области формирования КЭ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Foster J.C., Tetenbaum D., del Pozo C.F., et al. Aspect Angle Variations in Intensity, Phase Velocity, and Altitude for High-Latitude 34-cm E Region Irregularities // JGR. 1992. V. 97(A6). P. 8601–8617.
2. Voiculescu M., Haldoupis C., Pancheva D., et al. More evidence for a planetary wave link with midlatitude E region coherent backscatter and sporadic E layers // Annales Geophysicae. 2000. V. 18, N 9. P. 1182.
3. Berngardt O.I., Shpynev B.G. Towards a new technique of incoherent scatter signal processing // LANL e-prints archive. 2002. <http://arxiv.org/pdf/physics/0208003>.
4. Farley D.T. A plasma instability resulting in field-aligned irregularities in the ionosphere // JGR. 1963. V. 68. P. 6083–6097.
5. Buneman O. Excitation of field aligned sound waves by electron plasmas // Phys. Rev. Lett. 1963. V. 10. P. 25–27.
6. Rogister A., D'Angelo N. Type II irregularities in the equatorial electrojet // JGR. 1970. V. 75. P. 3879–3887.
7. Zherebtsov G.A., Zavorin A.V., Medvedev A.V., et al. Irkutsk Incoherent Scatter radar // Radio techniques and electronics. 2002. V. 47, N 11. P. 1–7.
8. Potekhin A.P., Berngardt O.I., Kurkin V.I., et al. Observation of abnormally powerful scattering with ISTP IS radar / Sixth International Symposium on Atmosphere and Ocean Optics // Proc. SPIE. 1999. V. 3983. P. 328–335.
9. Лебедев В.П. Изучение на Иркутском радаре некогерентного рассеяния тонкой структуры локационного сигнала, отраженного от Луны // Труды Байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике. VI Сессия молодых ученых «Волновые процессы в проблеме космической погоды». Иркутск, 2003. С. 117–119.
10. Лебедев В.П., Медведев А.В., Хахинов В.В. Радиолокационные модели космических аппаратов EGP и TIPS в метровом диапазоне волн // Труды Международной научной конференции «Излучение и рассеяние волн». Таганрог, 2005. С. 3.
11. Haldoupis C. A review of radio studies of auroral E-region ionospheric irregularities // Ann. Geophys. 1989. N 7. P. 239–258.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск,  
grkovich@iszf.irk.ru