УДК 550.388+537.874.4+551.501.815

ПЕРВЫЕ СОВМЕСТНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ РАДИОАВРОРЫ НА РАДАРАХ ИСЗФ СО РАН УЛЬТРАКОРОТКОВОЛНОВОГО И КОРОТКОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНОВ

О. И. Бернгардт^{*}, В. П. Лебедев, К. А. Кутелев, Д. С. Кушнарёв, К. В. Гркович

Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия

В настоящее время в Институте солнечно-земной физики (ИСЗФ) СО РАН функционируют два современных радара для диагностики ионосферы методом обратного рассеяния радиоволн: Иркутский радар некогерентного рассеяния ультракоротковолнового (УКВ) диапазона (154÷162 МГц) и Екатеринбургский когерентный радар коротковолнового (КВ) диалазона (8÷20 МГц). В работе анализируются результаты совместных наблюдений с их помощью мощного рассеяния (радиоавроры) 08.06.2015. Для определения положения радиоавроры разработаны оригинальные методы, учитывающие как особенности распространения радиоволн, так и особенности антенных систем этих радаров. Показано, что существуют области, где пространственное положение КВ и УКВ радиоавроры может совпадать. Это позволяет использовать радары как единый комплекс для диагностики характеристик мелкомасштабных высокоширотных неоднородностей в ионосферных слоях Е и F. Проведён сравнительный анализ характеристик и временной динамики области радиоавроры в КВ и УКВ диапазонах. С использованием данных спутников DMSP показано, что динамика радиоавроры во время этого эксперимента на Екатеринбургском когерентном радаре может быть связана с пространственной динамикой локализованной области с повышенным электрическим полем, перемещающейся от высоких к экваториальным широтам. Установлено, что за счёт более широкого сектора обзора радиоаврора на KB радаре устойчиво наблюдалась на 6÷12 мин ранее, чем на УКВ радаре. Это позволяет использовать данные Екатеринбургского когерентного радара для прогноза возникновения радиоавроры на Иркутском радаре некогерентного рассеяния.

ВВЕДЕНИЕ

Солнечная активность и существенные изменения характеристик достигающего магнитосферы Земли солнечного ветра (называемые возмущениями космической погоды) приводят к формированию сильных электрических полей в высокоширотных и, во время сильных возмущений, в среднеширотных областях ионосферы Земли. Наличие таких полей приводит к развитию в *E*и *F*-слоях ионосферы мелкомасштабных неоднородностей различного типа, вытянутых вдоль магнитного поля Земли. Подобные неоднородности существенно влияют на функционирование радиосредств в высокоширотных областях, особенно в диапазонах коротких (KB) и ультракоротких (УКВ) радиоволн, вызывая мощное ракурсное рассеяние радиосигналов (так называемое когерентное эхо, радиоаврору).

Наблюдение радиоавроры на различных частотах ведётся достаточно давно [1–8]. Исследование пространственных и частотных зависимостей помогает при построении моделей неоднородностей, а анализ их доплеровских скоростей в F-слое позволяет исследовать процессы в магнитосфере Земли и магнитосферно-ионосферное взаимодействие [9]. Основным инструментом исследования ионосферных неоднородностей является международная сеть когерентных коротковолновых радаров SuperDARN, насчитывающая в настоящее время более 30 радаров в Северном и Южном полушариях.

Геофизический комплекс инструментов ИСЗФ СО РАН в настоящее время включает в себя два радара, с помощью которых можно проводить диагностику характеристик радиоавроры. Это

^{*} berng@iszf.irk.ru

Иркутский радар некогерентного рассеяния (ИРНР), на котором ведутся разовые эксперименты по регистрации когерентного эхо с 1998 года [10] в УКВ радиодиапазоне, и Екатеринбургский когерентный радар декаметрового диапазона (ЕКВ), на котором проводится круглосуточный мониторинг подобных неоднородностей в КВ диапазоне с конца 2012 года [11].

1. РАДАРЫ ИСЗФ СО РАН И ГЕОМЕТРИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Геометрия эксперимента по совместному наблюдению радиоавроры на радарах ИСЗФ СО РАН 08.06.2015 приведена на рис. 1*а*. Показаны приближённые сектора обзоров радаров ЕКВ и ИРНР, цифрами обозначены номера лучей диаграммы направленности радара ЕКВ. Сектор обзора ИРНР приведён для нижних лепестков диаграммы направленности, на которых возможно наблюдение радиоавроры. Радиоаврора в основном лепестке диаграммы направленности ИРНР не наблюдается из-за невыполнения условий ракурсности для вертикальных траекторий зондирования.

Иркутский радар некогерентного рассеяния (координаты $52,8^{\circ}$ с. ш., $103,2^{\circ}$ в. д.) [12, 13] представляет собой моностатическую импульсную радиолокационную систему с частотным сканированием в диапазоне $154\div162$ МГц. Приёмно-передающая антенна ИРНР представляет собой рупор, разделённый перегородкой вдоль своей длинной оси на два симметричных полурупора, что позволяет использовать её как две независимые антенны. Каждый из полурупоров обеспечивает ширину диаграммы направленности (ДН) вдоль большой оси антенны около $0,5^{\circ}$ и 20° в поперечном направлении (рис. 1s). Формой диаграммы направленности во время излучения можно управлять изменением разности фаз возбуждающих сигналов в полурупорах, а во время приёма — сложением сигналов, принятых двумя полурупорами («каналами») с соответствующими фазовыми поворотами. В диапазоне углов $\pm 11^{\circ}$ разность фаз линейно меняется с антенным азимутом цели, что позволяет определять эти углы с точностью порядка 10'.

Первые наблюдения радиоавроры на ИРНР были проведены в 1998 году [10, 14]. Статистический анализ показал, что основное рассеяние наблюдается на высотах *E*-слоя 500÷1200 км к северу от радара, а угловая (ракурсная) чувствительность неоднородностей составляет порядка 10÷20 децибел на градус [15]. Геометрия наблюдений представлена на рис. 16.

Когерентный радар ЕКВ ИСЗФ СО РАН установлен в 180 км к юго-западу от Екатеринбурга на территории обсерватории «Арти» Института геофизики УрО РАН (координаты 56,43° с. ш., 58,56° в. д.) в 2012 году. Приёмно-передающая аппаратура радара представляет собой аналог стерео-радара CUTLASS сети SuperDARN и использует стандартное программное обеспечение радаров SuperDARN для обработки данных зондирования.

Радар ЕКВ работает в частотном диапазоне 8÷20 МГц. Диаграмма направленности радара на излучение формируется 16-ю эквидистантными антеннами, расположенными в линейной фазированной решётке. Это позволяет сканировать сектор обзора радара по 16 фиксированным направлениям. Угловое разрешение радара по азимуту составляет 3°÷6° в зависимости от частоты, в угломестном направлении диаграмма направленности почти изотропна (рис. 1*д*).

В штатном режиме радары SuperDARN излучают сигнал специальной формы, формируемой последовательным излучением идентичных мультиимпульсных последовательностей [16]. Это позволяет получить разрешение по дальности 45 км, временно́е разрешение на каждом из направлений составляет около 4÷8 с (или до 2 мин по всему сектору сканирования) [9]. Обычно параметры рассеянного сигнала оцениваются путём вычисления характеристик автокорреляционной функции. По её фазовой структуре определяется доплеровское смещение частоты рассеянного сигнала и радиальная составляющая скорости дрейфа неоднородностей, а по форме автокорреляционной функции — амплитуда сигнала и его спектральная ширина [9].



Рис. 1. Геометрия эксперимента и приблизительные диаграммы направленности антенн радаров при нулевом угле места (a, здесь φ — широта, Θ — долгота), геометрия наблюдения когерентного эхо на ИРНР (δ) и радаре ЕКВ (b) и диаграммы направленности ИРНР (z) и радара ЕКВ (∂)

В связи с особенностями распространения сигнала радиоаврора на радаре ЕКВ может наблюдаться в широком диапазоне дальностей и направлений (рис. 1*6*), что упрощает задачу мониторинга неоднородностей, но усложняет задачу определения их параметров по данным радиозондирования, в существенной степени зависящих от характеристик фоновой ионосферы [17–19].

Сложность одновременных наблюдений радиоавроры на радарах ЕКВ и ИРНР и совместной интерпретации полученных данных вызвана следующими причинами.

Во-первых, радар ИРНР расположен в средних широтах, поэтому наблюдение радиоавро-

ры на нём возможно только во время сильных геомагнитных возмущений, когда высокоширотные неоднородности существенно сдвигаются в сторону экватора. Во-вторых, основной лепесток диаграммы направленности ИРНР имеет практически вертикальное направление, поэтому наблюдения радиоавроры на нём возможны только на нижних боковых, существенно ослабленных лепестках [10, 14, 15]. В-третьих, диаграмма направленности ИРНР сильно зависит от частоты, т. е. подбор частоты радара для устойчивого наблюдения когерентного эхо, очень чувствительного к направлению луча зрения радара, достаточно сложен.

Для исследования возможностей совместной работы комплекса нами проводилась серия совместных экспериментов по регистрации когерентного эхо на ИРНР, единственным удачным из которых на настоящее время оказался эксперимент 8 июня 2015 года.

Из рис. 1*a* видно, что существует область пространства в районе лучей 13÷15 ЕКВ, где сектора обзоров радаров близки, что позволяет поставить задачу совместного анализа характеристик пространственно близких ионосферных неоднородностей в КВ и УКВ диапазонах одновременно.

2. СОВМЕСТНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ РАДИОЭХО В КВ И УКВ ДИАПАЗОНАХ 8 ИЮНЯ 2015 ГОДА

Результаты наблюдений радиоавроры в период 11:30–14:09 UT на радаре EKB (мощность рассеянного сигнала и доплеровская скорость неоднородностей как функции географической широты и долготы, а также времени) представлены на рис. 2. Все рисунки выполнены схематично, без калибровки диаграмм направленности радаров в предположении распространения вдоль дуги большого круга, без учёта неоднородности ионосферы. Поэтому реальные географические координаты несколько отличаются от приведённых на рисунке.

Из рис. 2 видно, что интенсивная радиоаврора, характеризующаяся высокой мощностью и большими доплеровскими скоростями, появляется в 11:45 UT в виде относительно малой локализованной области и дрейфует в экваториальном направлении. Как будет показано далее, доплеровские скорости неоднородностей достигают 700 м/с, что характерно для радиоавроры высот *F*-слоя в существенно возмущённых условиях.

На рис. З представлено поведение индекса $D_{\rm st}$ в период 07–09 июня 2015 года и результаты наблюдений радиоавроры на обоих радарах. Во время эксперимента индекс K_p достигал 6, а индекс $D_{\rm st}$ был меньше –70 нТл (рис. 3*a*), что характеризует этот период как геомагнитную бурю.

На рис. 3*6*-*г* показано поведение основных параметров, получаемых на радаре ЕКВ, без разделения по направлениям сигналов.

На рис. Зд приведена мощность рассеянного сигнала по данным ИРНР; видно несколько областей рассеяния. Нижний диапазон дальностей 200÷600 км соответствует некогерентно рассеянному сигналу, полученному в основном лепестке диаграммы направленности радара, и в грубом приближении дальность равна высоте точки рассеяния над радаром. Полосы связаны с фарадеевскими замираниями сигнала, вызванными поляризационными характеристиками антенны и распространением зондирующего сигнала в анизотропной (замагниченной) ионосферной плазме. Область рассеяния при дальностях $1000\div1200$ км в период 11:40-15:30 UT соответствует рассеянию на неоднородностях E-слоя, вытянутых вдоль магнитного поля Земли и наблюдаемых на нижних лепестках диаграммы направленности антенны [10, 15]. В этом случае дальность приблизительно равна дальности до области рассеяния, расположенной к северу от радара.

По результатам наблюдений на радаре EKB (рис. 3*6–г*) можно выделить следующие области. Область высоких скоростей, связанных с большими значениями электрического поля в 11:00– 13:00 UT (радиоаврора отмечена на рис. 3 цифрой I). На радаре ИРНР в этот период также



Рис. 2. Результаты наблюдений радиоавроры на радаре ЕКВ 08.06.2015. Панели a и c соответствуют мощности рассеянного сигнала P_l в секторе обзора радара, панели d и c — доплеровской скорости неоднородностей $V_{\rm D}$. Треугольником обозначена примерная диаграмма направленности ИРНР на нижних лепестках, время наблюдений указано на рисунках

наблюдалась радиоаврора. Область наблюдения рассеянных сигналов с невысокими доплеровскими скоростями при относительно малых дальностях (60°÷65° с. ш.) в 08:00–10:00 UT отмечена цифрой IV. На ИРНР в это время когерентное эхо не наблюдалось. Узость области рассеяния IV, низкая доплеровская скорость рассеивающих неоднородностей и малая дальность до области IV

О. И. Бернгардт, В. П. Лебедев, К. А. Кутелев и др.



Рис. 3. Индекс $D_{\rm st}$ в период 07–09.06.2015 (*a*, по данным [20]). Результаты наблюдений: мощность рассеянного сигнала (δ), допплеровское смещение частоты в единицах эквивалентной скорости (*в* и *г*) по данным радара ЕКВ и мощность рассеянного сигнала на ИРНР (∂ , здесь и далее R — дальность)

позволяет предположить, что возможным механизмом являлось рассеяние в *E*-слое, и в работе эта область исследоваться не будет.

Область, отмеченная цифрой III, соответствует сигналу возвратно-наклонного зондирования,

О. И. Бернгардт, В. П. Лебедев, К. А. Кутелев и др.

который характеризуется низкими скоростями и связан с рассеянием рефрагирующего в ионосфере сигнала поверхностью Земли. Кроме того, в данных ИРНР можно выделить период 14:30– 15:20 UT (область II), во время которого наблюдалось когерентное эхо, не регистрировавшееся отчётливо на радаре ЕКВ.

В данной работе нами проводится детальный анализ периода 11:00–13:00 UT (область I), отвечающего наиболее ярко выраженному и мощному явлению во время эксперимента. По пространственно-временному распределению интенсивности и скорости данные EKB анализировать сложно, поэтому мы изучали характеристики весовой функции

$$S(\varphi, \Theta, t) = |V_{\rm D}(\varphi, \Theta, t)| P_l(\varphi, \Theta, t), \tag{1}$$

где $V_{\rm D}(\varphi, \Theta, t)$ — доплеровская скорость, $P_l(\varphi, \Theta, t)$ — мощность рассеянного сигнала в децибелах, φ — широта, Θ — долгота.

Введение такой функции связано с тем, что скорость неоднородностей в *F*-слое пропорциональна напряжённости электрического поля [9], в то время как в *E*-слое электрическому полю пропорционален логарифм мощности, по крайней мере в УКВ диапазоне [21]. Таким образом, функция *S* отражает интенсивность электрического поля в нескольких моделях рассеяния.

На рис. 4 представлена динамика средних моментов функции $S(\varphi, \Theta, t)$ в зависимости от широты φ и долготы Θ . Энергия весовой функции E(t), плотность энергии весовой функции e(t), средняя широта $M_{\varphi}(t)$ и долгота $M_{\Theta}(t)$, размер области по широте $\sigma_{\varphi}(t)$ и по долготе $\sigma_{\Theta}(t)$ определяются следующими выражениями:

$$E(t) = \int S(\varphi, \Theta, t) \, \mathrm{d}\varphi \, \mathrm{d}\Theta, \qquad e(t) = \int S(\varphi, \Theta, t) \, \mathrm{d}\varphi \, \mathrm{d}\Theta \left/ \int \chi[S(\varphi, \Theta, t)] \, \mathrm{d}\varphi \, \mathrm{d}\Theta, \\ M_{\varphi}(t) = \frac{\int \varphi S(\varphi, \Theta, t) \, \mathrm{d}\varphi \, \mathrm{d}\Theta}{E(t)}, \qquad M_{\Theta}(t) = \frac{\int \Theta S(\varphi, \Theta, t) \, \mathrm{d}\varphi \, \mathrm{d}\Theta}{E(t)}, \\ (t) = \sqrt{\frac{\int [\varphi - M_{\varphi}(t)]^2 S(\varphi, \Theta, t) \, \mathrm{d}\varphi \, \mathrm{d}\Theta}{E(t)}}, \qquad \sigma_{\Theta}(t) = \sqrt{\frac{\int [\Theta - M_{\Theta}(t)]^2 S(\varphi, \Theta, t) \, \mathrm{d}\varphi \, \mathrm{d}\Theta}{E(t)}}, \qquad (2)$$

где $\chi[x]$ — функция Хевисайда.

 σ_{φ}

Из рис. 4*a*, *б* видно, что область интенсивного рассеянного сигнала (серая область) соответствует периоду 11:45–12:45 UT. Именно в это время существуют нерегулярные области, в которых одновременно наблюдаются высокая мощность рассеянного сигнала и большие абсолютные скорости, что говорит о мощном рассеянии на неоднородностях, ориентированных вдоль магнитного поля. Из рис. 4*e*, *e* видно, что область интенсивного рассеянного сигнала сосредоточена вблизи 80° в. д., и медленно перемещается по широте от 74° до 67° с. ш. Размер этой области (см. рис. 4*d*, *e*) составляет от 6° до 2° по широте и от 40° до 4° по долготе.

3. КАЛИБРОВКА РАДАРОВ КВ И УКВ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

3.1. Источники ошибок географической привязки данных радаров

Существенным фактором при оценке геометрии наблюдения рассеяния является географическая привязка данных. Сложности привязки данных эксперимента к конкретной зоне пространства имеют место для обоих радаров.

О. И. Бернгардт, В. П. Лебедев, К. А. Кутелев и др.



Рис. 4. Статистические характеристики положения и размера области рассеянного сигнала (до калибровки): энергия (a) и плотность энергии (б) весовой функции, средняя долгота (e) и широта (e), размер области по долготе (d) и широте (e). Серым цветом выделена область исследуемой радиоавроры

На радаре ЕКВ основным источником ошибок является рефракция КВ излучения в ионосфере, приводящая к существенной разнице между геометрической длиной траектории и групповой задержкой сигнала. Зависимость формы траектории распространения сигнала от распределения электронной концентрации также ухудшает точность интерпретации и географической привязки. Кроме того, структура фазированной антенной решётки радара (см. рис. 1*д*) такова, что азимут луча зависит от его угла места; это вносит дополнительные ошибки.

На радаре ИРНР основным источником ошибок является широкая по азимуту диаграмма направленности, не позволяющая точно определить азимут направления волны. Поскольку формирование диаграммы направленности в азимутальном направлении осуществляется с использованием механической конструкции (линейной решётки щелевых излучателей и замедляющей системы в виде открытой ребристой структуры), то её температурное расширение приводит к уходу углочастотной характеристики около $0,50\div0,75$ угл.мин/1 °С. Небольшое отличие в температурных характеристиках каналов приводит к независимому смещению фазовых диаграмм направленности, которое может медленно меняться в течение суток.

3.2. Географическая калибровка данных ИРНР

В зависимости от способа извлечения угловой информации из принимаемых сигналов, различают три основных метода определения координат в моноимпульсных системах: амплитудный, фазовый и комплексный [22].

Для определения азимута на рассеивающие неоднородности на ИРНР использовался фазоразностный метод с калибровкой по космическим источникам. В его основе лежит определение

О. И. Бернгардт, В. П. Лебедев, К. А. Кутелев и др.

направления на цель в одной координатной плоскости с помощью сравнения фаз сигналов, принимаемых двумя антеннами.

Для применения метода необходимо знание амплитудной и фазовой диаграммы направленности радара. В работе использовалась расчётная диаграмма направленности, в области основного лепестка многократно откалиброванная по данным наблюдений космических объектов [23].

Для расчёта профилей мощности рассеянного сигнала и разности фаз между каналами в измерениях на ИРНР использовался 5-элементный код Баркера с длительностью 200 мкс. Пример квадратурных компонент излучённого сигнала представлен на рис. 5a, b. Для анализа угловых характеристик рассеянного сигнала вводится комплексная функция когерентности или коэффициент межантенной корреляции η . Для вычисления η используются сигналы с обоих каналов антенны ИРНР:

$$\eta = \frac{\langle U_1 U_2 \rangle}{\sqrt{\left\langle |U_1|^2 \right\rangle \left\langle |U_2|^2 \right\rangle}},\tag{3}$$

где U₁ и U₂— сигналы с первого и второго полурупоров (каналов) антенны ИРНР соответственно.

Коэффициент корреляции рассчитывается для каждой задержки/дальности усреднением по ряду сеансов зондирования (100÷200 сеансов), что соответствует временному разрешению 16÷32 с. Разность фаз между каналами является аргументом коэффициента корреляции:

$$\Delta \phi = \arg \eta. \tag{4}$$

Двухканальная антенная система ИРНР работает как две антенны в схеме интерферометра. Разность хода волн определяется формулой

$$\Delta \phi = k_{\varphi} \gamma, \tag{5}$$

где $k_{\varphi}\approx 17,3$ — наклон фазо-азимутальной характеристики, γ — азимут в антенной системе координат.

Для учёта медленного дрейфа разности фаз полурупоров (дополнительного фазового смещения между полурупорами), вносящего вклад в точность определения азимута, а также для учёта космических шумов, вносящих вклад в амплитуду рассеянного сигнала, нами были проведены калибровочные измерения по известным космическим объектам — искусственным спутникам Земли (рис. 56) и радиогалактике Лебедь-А (рис. 5*г*-ж, область III).

Калибровка по спутникам позволяла выявить и учесть абсолютное значение (дополнительное фазовое смещение порядка 70°) и медленный дрейф разности фаз между полурупорами (порядка нескольких градусов) за время наблюдений когерентного эхо, а калибровка по радиоисточнику позволяла оценить дрейф разницы фаз и амплитуду космического шума (рис.5*г*-*ж*).

Результаты калибровки фазового нуля, выполненной по результатам наблюдения радиогалактики Лебедь-А, представлены на рис. $5r - \varkappa$. Для диапазона дальностей $1\,050 \div 1\,150$ км, на которых наблюдались радиоаврора, с помощью выражений (3) и (4) с учётом калибровки фазового нуля (рис. 5e) рассчитывались разность фаз arg η (рис. 5e), модуль коэффициента корреляции $|\eta|$ (рис. 5d) и мощность рассеянного сигнала (рис. 5e). Отметим, что наблюдения на частоте 155,8 МГц (серая линия на рис. 5d, e) в отличие от наблюдений на частоте 158,3 МГц (чёрная линия на рис. 5d, e), проводились круглые сутки, при этом в динамике мощности чётко прослежен суточный ход, связанный с прохождением галактических радиоисточников через диаграмму ИРНР (область III). Из рис. 5r - e видно, что в период от 20:00-22:00 UT наблюдается усиление шума, связанное с прохождением через диаграмму радара Млечного пути, рядом с которым расположена радиогалактика Лебедь-А. Радиоисточник Лебедь-А имеет угловые размеры несколько

О. И. Бернгардт, В. П. Лебедев, К. А. Кутелев и др.



Рис. 5. Результаты калибровки приёмного тракта ИРНР. Панели *а* и *б*: форма квадратурных компонент излучённого сигнала (чёрная линия — эксперимент, серая линия — аппроксимирующая модель), соответствующих действительной (*a*) и мнимой (*б*) составляющей его комплексной огибающей, измеренные по сигналу, отражённому от космического объекта с большим сечением рассеяния. Панель *6*: дрейф фазового нуля arg η , определённый наблюдениям на ИРНР каталогизированных космических объектов. Панели *г* и *д*: межрупорная разность фаз arg η и модуль коэффициента корреляции $|\eta|$ соответственно. Панель *е*: мощность сигнала, рассеянного на дальности 1 100 км на двух зондирующих частотах (чёрная линия — 158,3 МГц, серая линия — 155,8 МГц); панель *ж*: мощность сигнала, рассеянного на дальности 1 100 км, на двух зондирующих частотах после вычитания мощности шумов галактических радиоисточников. Серые зоны I–II соответствуют ионосферному рассеянию, зона III — прохождению через диаграмму радиогалактики Лебедь-А

угловых минут и по сравнению с диаграммой направленности ИРНР может считаться точечным, что делает его удобным объектом для калибровки. Видно, что тренд измеренной разности фаз (чёрная линия на рис. 5*г*) и расчётная динамика разности фаз для Лебедя-А (штриховая серая линия на рис. 5*г*) совпадают. Это позволяет использовать данные после коррекции фазового нуля (рис. 5*в*) для точных расчётов азимута угла прихода и мощности рассеянного сигнала (рис. 5*ж*).

В результате приведённых выше расчётов была выполнена полная калибровка антенного тракта и получен временной ход параметров радиоавроры с точностью, максимально достижимой на ИРНР в настоящее время. На рис. 6 представлены результаты обработки сигналов обратного рассеяния для частоты 158,3 МГц: мощность сигнала, зарегистрированная соответственно верхним (рис. 6*a*, δ) и нижним (*b*, *c*) полурупором, модуль (*d*, *e*) и аргумент (*ж*, *s*) коэффициента

О. И. Бернгардт, В. П. Лебедев, К. А. Кутелев и др.



Рис. 6. Результаты обработки и
оносферного сигнала на ИРНР для частоты 158,3 МГц. Здес
ь P_1 и P_2 — мощности сигналов с верхнего и нижнего полурупора соответственно. На панеля
х ${\it 6}, {\it c}, {\it e}, {\it 3}$ приведена зависимость исследуемых параметров от дальности для различных моментов времени

О. И. Бернгардт, В. П. Лебедев, К. А. Кутелев и др.

когерентности после устранения дрейфа фазового нуля. Представленные результаты получены усреднением перечисленных характеристик по ряду сеансов зондирования (100÷200 сеансов) для рабочей частоты, что соответствует временному разрешению 16÷32 с. Рисунки 6*б*, *г*, *е з* соответствуют нескольким моментам времени.

Из рис. 6 видна характерная особенность радара ИРНР: существенная разница в абсолютных мощностях принятого сигнала для верхнего (рис. 6*a*, *б*) и нижнего (*6*, *г*) полурупоров, связанная с неидентичностью приёмных трактов.

Радиоаврора наблюдается на частоте 158,3 МГц и не наблюдается на частоте 155,8 МГц в течение всего эксперимента (рисунки для частоты 155,8 МГц не приведены, но это видно на рис. 5∂ , \mathcal{H}). Это позволяет предполагать, что влияние частотно-угловых характеристик антенны на данный эффект более существенно, чем влияние среды распространения или характеристик рассеивателей. Данный эффект приводит к тому, что разность фаз между полурупорами (и, как следствие, направление на область рассеяния) может быть определена только для частоты 158,3 Мгц (рис. 6∂).

Отчётливо выделяются две области радиоавроры: более слабая по энергетике и узкая по дальности на дальности 1050 км и более сильная и растянутая — на дальности 1100 км. Детально ход параметров для фиксированных моментов времени показан на рис. 6*б*, *г*, *е*. Из них видно, что в ближней области мощность сигнала и нормированный коэффициент корреляции существенно (примерно в 3 раза) меньше, чем в дальней. В то же время межканальная разница фаз (а следовательно, и азимут рассеивающей области) примерно одинаковы и от дальности не зависят (рис. 6*з*).

3.3. Географическая калибровка данных радара ЕКВ

Эффективными рассеивателями радиосигнала КВ диапазона в ионосфере являются неоднородности ионосферной плазмы, вытянутые вдоль силовых линий магнитного поля Земли. Условием рассеяния сигнала на таких неоднородностях в направлении радара в случае моностатического обратного рассеяния служит ортогональность волнового вектора электромагнитной волны и силовой линии магнитного поля в точке рассеяния [18]. Радиоволны рабочего диапазона радара ЕКВ испытывают значительную рефракцию в ионосфере, что, с учётом структуры магнитного поля Земли в высокоширотных областях, приводит к существованию протяжённых зон эффективного рассеяния сигнала радара. Эти зоны могут быть расположены на любой высоте — в *F*-слое, в *E*-слое и в межслоевой долине (см. рис. 1*в*).

Особенности структуры антенной решётки приводят к тому, что диаграмма направленности радара имеет вид поверхности конуса, угол при вершине которого традиционно связывается с азимутом излучения (рис. 1∂). Однако при относительно высоких углах возвышения, соответствующих многоскачковому распространению и рассеянию в *F*-слое, необходимо учитывать эту особенность антенной решётки, связывающую азимут излучения с углом места. Таким образом, для корректной интерпретации результатов измерений необходимо производить географическую привязку зон обратного рассеяния сигнала по азимуту. Это можно сделать только с привлечением модели распространения и рассеяния радиосигнала, которая должна включать модель ионосферы и геомагнитного поля.

Из геометрических соображений зависимость азимута выхода луча α с фазированной решётки от угла места β этого луча и угла при вершине конуса α_0 (соответствующего азимуту луча при нулевом угле места) описывается формулой

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{\sin\alpha_0}{\cos\beta}\right) + \alpha_c,\tag{6}$$

О. И. Бернгардт, В. П. Лебедев, К. А. Кутелев и др.

где $\alpha_{\rm c}$ — азимут центрального направления обзора. Таким образом, направление луча совпадает с направлением текущего лепестка только при угле места излучения $\beta = 0^{o}$.

В плоскости, проходящей через радар, точку рассеяния и направление излучения радиоволны, задача расчёта распространения радиоволны может быть сведена к хорошо исследованной двумерной задаче [24].

Пространственное распределение плазменной частоты ионосферы задавалось с помощью международной референтной модели ионосферы IRI [25]. В качестве входного параметра бралась дата проведения эксперимента 08.06.2015. Модельная ионосфера разбивалась на 10⁴ точек: 100 точек по высоте (шаг 4 км) и 100 точек по дальности (вдоль траектории, что примерно соответствует шагу 30 км). При решении задачи распространения излучения интерполяция среды между точками сетки осуществлялась с помощью квадратичных *B*-сплайнов [26].

Задача Копи для системы лучевых уравнений геометрической оптики, описывающих распространение радиоволны (характеристических уравнений), решалась с помощью явного метода Адамса—Башфорта 3-го порядка [27, 28]. Шаг интегрирования по групповому пути составлял 1 км. Частота передатчика равнялась 11 МГц, что примерно соответствует реальной частоте радара в день наблюдений. Магнитное поле Земли рассчитывалось с помощью международной референтной модели геомагнитного поля IGRF-12 [29]. На рис. 7*a* представлен пример пространственного распределения угла δ между геомагнитным полем **B** и волновым вектором **P** для различных углов места выхода луча. Распределение приведено в виде прореженных лучевых траекторий, полученных в результате расчётов, цвет точки луча соответствует углу δ на данном участке траектории. В рамках модели существенной ракурсной чувствительности (см., например, [3, 30]) можно считать, что наиболее эффективно обратное рассеяние происходит при углах $\delta = 90^{\circ} \pm 2^{\circ}$ (этим зонам соответствует белый цвет на рис. 7*a*).

Поскольку модель IRI является усреднённой, она нуждается в коррекции при использовании в конкретных ионосферных условиях. Такой механизм коррекции в модели реализован на основе задания критической частоты слоя $F_2(f_{0F_2})$ и/или высоты максимума слоя $F_2(h_{mF_2})$ для каждой дальности вдоль трассы.

В данной работе использовался метод корректировки, основанный на анализе сигнала возвратно-наклонного зондирования радара ЕКВ. Основным исследуемым параметром является групповой путь τ_{max} максимума сигнала возвратно-наклонного зондирования, связанный с фокусировкой на границе мёртвой зоны. Эта зона достаточно плавно сдвигается при изменении основных характеристик фоновой ионосферы — высоты максимума $h_{\text{m}F_2}$ и критической частоты $f_{\text{o}F_2}$. Основные характеристики данного максимума (прежде всего, его положение) определяются свойствами ионосферы вблизи точки отражения сигнала. Алгоритм использованного метода коррекции состоит из нескольких этапов.

На первом этапе по данным радара ЕКВ рассчитывается групповой путь до максимума сигнала возвратно-наклонного зондирования на данный момент времени для данного луча, пропорциональный измеренной групповой задержке сигнала. На втором этапе проводится поиск адаптированной модели IRI, приводящей к наблюдаемой в эксперименте дальности мёртвой зоны. Для этого вводится понятие корректора частоты f_{oF_2} как отношение критической частоты слоя F_2 в скорректированной модели к аналогичной характеристике в немодифицированной модели IRI: $C_{f_{oF_2}} = f_{oF_2}/f_{oF_{2IRI}}$). Этот коэффициент считается одинаковым для всей ионосферы для данного луча в конкретный момент времени. Профиль электронной концентрации находится в три этапа: вычисление $f_{oF_{2IRI}}$ по нескорректированной модели IRI, коррекция f_{F_2} домножением на текущий корректор ($f_{oF_2} = C_{f_{oF_2}}f_{oF_{2IRI}}$), вычисление профиля электронной концентрации по модели IRI с дополнительным входным параметром f_{oF_2} . На основе системы лучевых уравнений [24] и полученной скорректированной модели среды распространения находится положение зоны фо-

О. И. Бернгардт, В. П. Лебедев, К. А. Кутелев и др.



Рис. 7. Результаты моделирования зон эффективного рассеяния на радаре ЕКВ в 13:00 UT 08.06.2015. Панель *a*: луч 15 без коррекции модели IRI; панель *б*: луч 15 до (бледный цвет) и после (насыщенный цвет) коррекции модели IRI; панели *в* и *г*: до и после коррекции модели IRI соответственно; панели ∂ и *e*: зависимость радиолокационной дальности $R_{\rm eff}$ от дальности по Земле *L* до и после коррекции модели IRI соответственно. На панелях $\delta-e$ представлены только зоны с углом $\delta = 90^{\circ} \pm 2^{\circ}$

кусировки сигнала и групповой путь до его максимума. Данный этап повторяется несколько раз для различных значений корректора. Таким образом получается зависимость радиолокационной задержки до максимума сигнала возвратно-наклонного зондирования для данного луча радара от величины корректора.

На третьем этапе по полученной зависимости находится оптимальный коэффициент $C_{f_0F_2}^0$, при котором модельный сигнал имеет максимум на той же дальности, что и экспериментальный. Данный коэффициент будет определять требуемое увеличение f_{0F_2} по сравнению с его значением в немодифицированной модели IRI для каждого вычисленного профиля электронной концентрации ($f_{0F_{2corr}} = C_{f_0F_2}^0 f_{0F_{2IRI}}$). В дальнейшем вычисление профилей электронной концентрации также происходит в три этапа: вычисление $f_{0F_{2IRI}}$ по нескорректированной модели IRI, коррекция f_{0F_2} домножением на оптимальный корректор $C_{f_0F_2}^0$, вычисление профиля электронной концентрации по модели IRI с модифицированной критической частотой слоя F_2 ($f_{0F_{2corr}}$).

Результат моделирования зон ракурсного рассеяния до и после корректировки модели IRI на фиксированном луче приведён на рис. 76. Из него видно, что коррекция параметров среды приводит к значительным сдвигам зон ортогональности в *F*-слое и практически не меняет положение зоны в *E*-слое. Это связано с тем, что до *E*-слоя рефракция очень слаба и модель ионосферы слабо влияет на траекторию. Сдвиги на втором и третьем скачке распространения значительно больше, чем на первом: это связано с нарастанием отклонения с расстоянием за счёт накопления эффекта рефракции вдоль траектории.

Аналогичные изменения происходят и при корректировке на остальных лучах радара. На рис. 7*6*, *г* приведено расположение зон ортогональности до (*6*) и после (*г*) коррекции. Цветом показана высота точки рассеяния. Более тёмный цвет соответствует *E*-слою, а более светлые цвета — *F*-слою. Заметим, что зоны рассеяния в *E*-слое практически лежат на конфигурационных азимутах радара, т. к. в эти зоны попадают лучи с малыми углами места, практически совпадающие по направлению с формальными азимутами, вычисленными по земной поверхности. Зоны рассеяния в *F*-слое значительно отклоняются от формальных азимутов, т. к. вклад угла места *β* в реальный азимут луча становится значительным (см. формулу (6)).

Для географической привязки реальных данных необходимо установить зависимость дальности точки рассеяния от радиолокационной задержки, измеряемой радаром. Влияние коррекции ионосферы на эту зависимость показано на рис. 7*д*, *e*, цвет обозначает высоту точки рассеяния. Стоит обратить внимание на то, что интересующая нас зависимость для *E*-слоя практически не меняется при коррекции модели IRI. Это значит, что при исследовании рассеяния в *E*-слое в большинстве случаев, не требующих высоких точностей, нет необходимости корректировать модели среды распространения под реальные данные.

При этом для географической привязки зон рассеяния в *F*-слое коррекция модели необходима, иначе ошибка в определении местоположения может достигать 500 км по дальности и десятка градусов на координатной сетке, что критично для большинства геофизических приложений.

Таким образом, мы получили зависимость дальности по земле до точки рассеяния, а следовательно и географических координат этой точки, от радиолокационной дальности (рис. 7*e*). Неразрешённым остаётся вопрос выбора точки рассеяния — в *E*-слое или *F*-слое, т. к. одной и той же радиолокационной задержке могут соответствовать зоны в обоих ионосферных слоях.

4. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РАДИОАВРОРЫ В 11:00-13:00 UT

4.1. Динамика рассеивающей области по данным радара ИРНР

Как было показано ранее, радиоаврора на ИРНР наблюдается на нижних боковых лепестках диаграммы направленности, поэтому непосредственное изучение характерной области рассеяния и её пространственной динамики существенно затруднено.

Для решения задачи восстановления пространственно-временной динамики радиоавроры нами использовалось гауссовое представление с ненулевым средним для большинства используемых характеристик: зависимости мощности от дальности P(R), формы неоднородности, а также диаграмм направленности антенных полурупоров и суммарной диаграммы направленности антенны. Для определения параметров модельной зависимости мощности от дальности P(R) (средней дальности R_0 и размера области σ_R) по экспериментально измеренным значениям использовался метод наименьших квадратов. Для определения угловых размеров рассеивающей области, характеризуемой гауссовыми параметрами (средним азимутом γ_0 и азимутальной шириной σ в диапазоне $R \in [R_0 - \sigma_R, R_0 + \sigma_R]$) определялась средняя разность фаз между каналами $\Delta \phi$ (см. формулы (3)–(5)).

В данной работе предполагается, что область радиоавроры можно определять положением центра области рассеяния (средней дальностью R_0 и средним азимутом γ_0) и характерными пространственными размерами этой области (продольным σ_R и угловым поперечным σ). Основное направление на область радиоавроры в этом предположении определяется лучами, перпендикулярными к силовым линиям геомагнитного поля. Выбор такого метода связан с тем, что в случае данного эксперимента алгоритм [15] будет работать неустойчиво, поскольку для его устойчивости требуется наличие радиоавроры как на дальности 1 100 км, так и на дальности 550 км [31]. В качестве модели магнитного поля нами была выбрана международная референтная модель IGRF [29], хорошо себя зарекомендовавшая в решении подобных задач [15].

Для антенны ИРНР по данным о дальности и азимутальном угле практически невозможно без дополнительных предположений определить угол места, т.е. географическое положение этой области. Анализ показал, что для заданных антенного азимута и дальности существует единственное решение (угол места или высота области рассеяния), при которых обеспечивается условие перпендикулярности (см. рис. 8л, м).

Оценку углового поперечного размера области рассеяния σ можно получить, проанализировав модуль коэффициента корреляции сигналов на полурупорах η . При наличии шума, не коррелирующего с сигналом, выражение для коэффициента корреляции (3) можно записать в виде

$$\eta = \eta_{\rm S} \, \frac{S_{\rm N}}{S_{\rm N} + 1} + \eta_{\rm N} \, \frac{1}{S_{\rm N} + 1} \,, \tag{7}$$

где $S_{\rm N}$ — отношение сигнал/шум, $\eta_{\rm S}$ — коэффициент корреляции в отсутствие шума, $\eta_{\rm N}$ — коэффициент корреляции шумового сигнала (или фоновый уровень).

В модели гауссовых диаграмм направленности полурупоров и суммарной диаграммы направленности антенны выражение η_S для коэффициента когерентности сигналов, принятых полурупорами, в отсутствие шумов имеет вид

$$\eta_S = \exp\left\{ \left[i\gamma - 2\sigma^2 \left(\frac{k_{\varphi}^2}{4} + \frac{\gamma_l^2}{\Delta\theta^2} \right) \right] \frac{\Delta\theta_0^2 \,\Delta\theta^2}{\Delta\theta_0^2 \,\Delta\theta^2 + 2\sigma^2 \left(\Delta\theta_0^2 + \Delta\theta^2 \right)} \right\}.$$
(8)

Здесь $l = 1, 2, k_{\varphi}$ — наклон фазо-азимутальной характеристики (5), $\gamma_1 = 0.83^\circ$, $\gamma_2 = -0.83^\circ$ — антенные азимуты максимума диаграммы направленности верхнего и нижнего полурупора соот-

ветственно относительно максимума диаграммы направленности антенны при синфазном сложении полурупоров, $\Delta \theta = 10.7^{\circ}$ — ширина диаграммы направленности полурупора, $\Delta \theta_0 = 6.4^{\circ}$ — ширина диаграммы антенны ИРНР при синфазном излучении верхнего и нижнего полурупоров.

В выражении (8) явно выделен известный [32] факт зависимости модуля η_S от углового размера рассеивающей области σ . Обычно отношение сигнал/шум и коэффициент корреляции шума могут быть получены из измерений, тогда на основе (7) и (8) можно сделать оценку углового размера рассеивающей области σ .

Измерения показали, что $\eta_N \approx 0,08$ и $\eta \approx 0,28$ (их можно оценить по рис. 6*e*, взяв за η_N значение на малых дальностях, где нет когерентного эхо, а за η — значение в максимуме коэффициента корреляции, на дальности 1 100 км). Отношение сигнал/шум $S_N \approx 0,43$ можно оценить по рис. 6*b*, взяв соотношение между максимальной и минимальной мощностью. Подставляя указанные значения в формулу (7), получаем $\eta_S = 0,75$, что согласно (8) соответствует поперечному угловому размеру рассеивающей области $\sigma \approx 3,2^{\circ}$ или пространственному поперечному размеру около 60 км.

На рис. 8a-u приведены результаты обработки экспериментальных данных (здесь $\tilde{\alpha}$ и $\tilde{\beta}$ – азимут и угол места для ИРНР соответственно). Как показал анализ, основным для выводов о положении и поведении радиоавроры следует считать период 11:50–13:10 UT, когда регистрировался наиболее мощный сигнал (рис. 8a). Положение области обратного рассеяния в рассматриваемый период времени зафиксировано на дальности 1107 ± 10 км (рис. 8b), азимуте $353^{\circ}\pm0.8^{\circ}$ (рис. 8d), угле места $0.2^{\circ}\pm0.15^{\circ}$ (рис. 8s), что соответствует высоте 99.5 ± 1.2 км (рис. 8b), долготе $100.7^{\circ}\pm0.3^{\circ}$ (рис. 8e) и широте $62.6^{\circ}\pm0.1^{\circ}$ (рис. 8u), причём продольный размер рассеивающей области (вдоль луча зрения) менялся в диапазоне 58 ± 20 км (рис. 8c).

Динамика рассматриваемых параметров в периоды 11:30–11:50 UT и 13:10–13:30 UT, особенно ярко выраженная в изменении азимута и долготы (рис. 8 ∂ , e), связана не с перемещением рассеивающей области, а с падением отношения сигнал/шум, (см. рис. 8a), приводящим к уменьшению коэффициента корреляции полурупоров η (рис. 8e) и, как следствие, к увеличению ошибки в определении разности фаз $\Delta \phi$. Это приводит к ошибке нахождения антенного азимута (рис. 8 ∂) и других производных от него координатных характеристик (рис. 8e–u).

Сравнение положения областей, в которых выполняются условия ракурсности (рис. 8κ , n) для различных высот рассеяния, распределения азимутов углов прихода (рис. 8m) и динамики дальностей до области рассеяния (рис. 8δ) показывает, что высота области рассеяния варьируется достаточно мало и лежит почти на границе линии горизонта радара. Это, в свою очередь, позволяет предположить, что основной рассеивающий слой может быть расположен ниже $99 \div 100$ км (рис. 8ϵ) и высока вероятность того, что на самом деле мы видим лишь его верхнюю область, а нижняя его часть скрыта линией горизонта. Также это говорит о том, что слой может быть достаточно узким по высоте (не выходящим за пределы 100 км), поскольку в случае его существенной ширины условия ракурсности выполнялись бы одновременно в большем диапазоне азимутов, чем наблюдалось в эксперименте.

4.2. Динамика рассеивающих областей по данным радара ЕКВ

На рис. 9a-e приведена зависимость продольной скорости ионосферных неоднородностей от дальности и времени. Высокие абсолютные значения скорости, превышающие 40 м/с, позволяют устойчиво выделять области радиоавроры на фоне остальных рассеянных сигналов. Как видно из рис. 9a-e, мощное рассеяние на радаре ЕКВ наблюдается на лучах 10–14 и практически не наблюдается на луче 15. В то же время зоны, в которых выполняются условия ракурсности, необходимые для рассеяния, на луче 15 существуют (рис. 9c). Это говорит о том, что область

О. И. Бернгардт, В. П. Лебедев, К. А. Кутелев и др.



Рис. 8. Временна́я динамика восстановленных по данным ИРНР мощности рассеянного сигнала (a) и пространственных характеристик области радиоавроры: параметры, полученные в результате обработки экспериментальных данных $(\delta - u)$; расчётное положение областей перпендикулярности луча зрения магнитному полю как функция широты и долготы (κ) и азимута и дальности (Λ) . Панель κ : распределение азимутов углов прихода рассеянного сигнала (гистограмма) и диаграмма направленности антенны (сплошная линия). Цифры на панелях κ и Λ соответствуют высоте точки (в километрах), для которой радиус-вектор из ИРНР перпендикулярен силовой линии магнитного поля



Рис. 9. Доплеровские скорости по данным радара ЕКВ на лучах 10 (*a*), 11 (*b*), 12 (*d*), 13 (*b*), 14 (*v*) и 15 (*b*). Замкнутой серой зоной обозначена область наблюдения радиавроры. Панель *ж*: области возможного наблюдения радиоавроры на радаре ЕКВ и область её наблюдения на ИРНР. Панель *з*: траектории распространения сигнала (линии) и области ортогональности (серые области) в 12:30–12:40 UT на луче 14 для частоты 11 МГц

рассеяния, по-видимому, ограничена по широте траекторией луча 14. Из этого следует, что наиболее интенсивные действующие неоднородности в KB диапазоне можно считать ограниченными по широте областью порядка $62^{\circ} \div 64^{\circ}$ с. ш. в зависимости от высоты рассеяния. В то же время из рис. 9*з* видно, что рассеяние, наблюдаемое на радаре EKB, может возникать как в *F*-, так и в *E*слое и требуется дополнительная информация для точной интерпретации. Пересечение областей ракурсности на радаре EKB (рис. 9*ж*, серые области) с областями наблюдения радиоавроры по данным ИРНР (чёрная очерченная область) позволяет сделать заключение о потенциальной возможности одновременного наблюдения одной и той же пространственной области (или близких областей) двумя радарами.

Как показал анализ данных спутников DMSP [33] (см. рис. 10), в указанное время 11:00–13:00 UT в области долгот 30°÷65° в. д. действительно наблюдалось возникновение области высокого электрического поля со сложной мелкомасштабной пространственной структурой (синяя линия) с её последующим экваториальным распространением (зелёная сплошная и тёмнозелёная штриховая линии) и уменьшением напряжённости. После 13:00 UT скачок скорости слабо выражен в данных DMSP.

При анализе нами была проведена предварительная коррекция горизонтальной ионной скорости, полученной на спутниках DMSP, заключающаяся вычитании от измеренной горизонтальной

О. И. Бернгардт, В. П. Лебедев, К. А. Кутелев и др.



Рис. 10. Динамика горизонтальной скорости ионов $V_{\rm I}$ по данным спутников DMSP. На панелях *з*, *u* — на карте совместно с данными о положении области по данным радаров для неоднородностей на высоте *E*-слоя (*з*) и *F*-слоя (*u*). Серым треугольником отмечена область наблюдения радиоавроры на ИРНР, чёрными квадратами — динамика области рассеяния на радаре EKB. Серая стрелка указывает динамику перемещения области высоких ионных скоростей (высоких электрических полей) по данным спутников DMSP

О. И. Бернгардт, В. П. Лебедев, К. А. Кутелев и др.

скорости ионов скорости движения в восточном направлении (вдоль параллели)

$$V_{\rm E}[{\rm \kappa}{\rm m/c}] = \frac{2\pi (R_{\rm E}[{\rm \kappa}{\rm m}] + H[{\rm \kappa}{\rm m}])\cos\varphi}{86\,400} \,[{\rm \kappa}{\rm m/c}],\tag{9}$$

связанной с суточным вращением Земли (точнее, проекции скорости $V_{\rm E}$ на траекторию полёта спутника) [33]. Здесь $R_{\rm E}$ — радиус Земли, H — высота полёта спутника, φ — его географическая широта. Это позволяет частично компенсировать эффект коротации ионов и земной поверхности и более корректно связывать измеренную скорость частиц с электрическим полем в ионосфере.

Приведённое на рис. 10s, *u* сопоставление позволяет говорить о том, что возникновение перемещающейся области скорее всего связано с проникновением узкой области высоких электрических полей со сложной внутренней структурой с характерным размером порядка нескольких градусов по широте и $10^{\circ} \div 15^{\circ}$ по долготе на средние широты.

Следует заметить, что в данных радара ЕКВ движение неоднородностей начинается приблизительно с 75° с. ш., как и в данных DMSP, что также подтверждает предположение о связи механизма генерации наблюдаемой радиоавроры с интенсивным электрическим полем. Вытянутость наблюдаемых положений радиоавроры вдоль траектории перемещения электрического поля также подтверждает указанную связь.

5. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сигналы радиоаворы в период 11:00–13:00 UT были нами выделены из данных EKB по высокому доплеровскому смещению частоты (диапазон скоростей 200÷1000 м/с, рис. 3*г*).

На рис. 11 приведены значения характеристик сигналов с учётом проведённых калибровок обоих радаров. Из рис. 11*a*, *e*, *e*, *e* видно, что на KB радаре (EKB) аврора начала устойчиво наблюдаться на $6\div12$ минут раньше, чем на УКВ радаре (ИРНР). Это связано, прежде всего, с расширенным сектором обзора радара ЕКВ, позволяющим регистрировать возмущения с более высоких широт (рис. 116).

Полученные данные показывают (рис. 11d), что для более низких широт (60°÷64° с. ш.) на KB радаре мощность рассеянного сигнала была несколько ниже, чем для более высоких широт, в то время как наблюдаемые доплеровские скорости при этом были выше (рис. 11c). Это позволяет предположить, что на более низких широтах на радаре ЕКВ нами наблюдалось скорее рассеяние в *F*-слое, характеризуемое меньшими амплитудами и бо́льшими скоростями.

Более реалистичным с нашей точки зрения является предположение о рассеянии KB сигнала на неоднородностях F-слоя (рис. 9s, 10u). Для наблюдаемых дальностей радиоавроры от радара предположение о рассеянии в F-слое не противоречит общепринятой модели зависимости виртуальной высоты рассеяния от расстояния [34]. В этом случае высота рассеяния, соответствующая зоне рассеяния на ЕKB, составляет величину порядка 170÷240 км (рис. 9s). Тогда наблюдаемая доплеровская скорость на радаре ЕKB является следствием дрейфа в скрещённых электрическом и магнитном полях [9] и может быть использована для оценок соответствующей составляющей электрического поля. Из рис. 9s, 10s видно, что сильная рефракция в E-слое (существование которого предсказывается проведённым нами моделированием) также может приводить к рассеянию и на высотах E-слоя.

Исходя из вышесказанного, высота KB радиоавроры на основе полученных данных, по-видимому, не может быть определена, а точность определения широты KB радиоавроры на долготе наблюдения УKB радиоавроры во время этого эксперимента не может быть выше, чем 2°.

Из рис. 11*д* видно, что на луче 15 интенсивного рассеяния не наблюдалось, что связано, по-видимому, с исчезновением в этой области условий для формирования неустойчивостей —

О. И. Бернгардт, В. П. Лебедев, К. А. Кутелев и др.



Рис. 11. Сравнение результатов, полученных на различных радарах: доплеровская скорость на радаре ЕКВ (a, чёрный цвет) и мощность рассеянного сигнала на радаре ИРНР (a, серый цвет); временна́я динамика мощности рассеянного сигнала (e), вероятной высоты рассеяния (e) и ширины спектра, приведённой к единицам скорости (e) на радаре ЕКВ; широта и долгота рассеяния на радарах (b), широтная зависимость мощности рассеянного сигнала (d) и доплеровской скорости (c) на радаре ЕКВ

высоких электрических полей. Это даёт возможность оценить нижнюю границу проникновения электрического поля в это время как $62^{\circ} \div 63^{\circ}$ с. ш.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведены результаты одновременных наблюдений 08.06.2015 радиоавроры в КВ и УКВ радиодиапазонах по данным радаров ИСЗФ СО РАН и проведён предварительный анализ их пространственных, временных и энергетических характеристик.

Проведены первые азимутальные измерения положения радиоавроры на ИРНР с учётом особенностей антенной системы этого радара. Проведена калибровка измерений по сигналам спутников и радиоисточников, впервые позволившая определить на ИРНР средний азимут прихода радиоавроры (в модели локализованного рассеивателя) и локализовать тем самым рассеивающую область в пространстве.

Впервые на радаре ЕКВ проведено определение траекторий распространения сигнала с учётом особенностей его антенной системы, и специально разработанной методики калибровки мо-

дели IRI непосредственно по данным радара EKB. Показано, что калибровка радара с учётом рефракции и особенностей диаграммы направленности может приводить к смещению детектированных областей рассеяния на расстояние до 500 км.

Численное моделирование показало, что существуют условия, при которых возможно одновременное наблюдение пространственно близких областей радиоавроры двумя радарами (ИРНР и ЕКВ). Проведённая калибровка обоих радаров показала, что указанная область радиоавроры в период 11:00–13:00 UT не наблюдалась на широтах ниже 62° с. ш.

Показано, что основным вероятным механизмом, определяющим динамику хода интенсивности УКВ радиоавроры в период 11:00–13:00 UT на ИРНР, является групповое движение локализованной области высоких электрических полей от высоких широт к низким, подтверждающееся данными спутников DMSP. Наличие этих полей проявляется в возникновении декаметровых неоднородностей, регистрируемых КВ радаром (по данным проведённого эксперимента эти неоднородности не могут быть привязаны к конкретной высоте), и неоднородностей *E*-слоя, регистрируемых УКВ радаром.

Показано, что радиоаврора на радаре ЕКВ наблюдалась на 6÷12 мин раньше, чем на ИРНР, что связано с более широким сектором обзора радара ЕКВ в области более высоких широт. Это может быть использовано в том числе и для построения методик предсказания появления радиоавроры на УКВ радаре (ИРНР) по данным КВ радара (ЕКВ) при проведении совместных экспериментов.

Разработанные методы позволили повысить точность географической привязки измерений радиоавроры на радарах ИРНР и ЕКВ и могут в дальнейшем применяться как для интерпретации совместных, так и для проведения раздельных измерений радиоавроры на этих радарах.

Авторы благодарны Национальному управлению океанических и атмосферных исследований США (NOAA) за предоставление данных спутников DMSP, а также сотрудникам ИСЗФ СО РАН А.В. Медведеву и Н.И. Невидимову за помощь в организации эксперимента. Экспериментальные данные получены с использованием уникальной научной установки «Иркутский радар некогерентного рассеяния» рег. No 01–28 и радара ЕКВ ИСЗФ СО РАН.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы Президиума РАН № 31 (проект № 0344–2014–0022).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Lovell A. C. B., Clegg J. A., Ellyett C. D. // Nature. 1947. V. 160. P. 372.
- 2. Багаряцкий Б. А. // Успехи физ. наук. 1961. Т. 63, вып. 2. С. 197.
- 3. Свердлов Ю. Л. Морфология радиоавроры. Л.: Наука, 1982. 160 с.
- 4. Успенский М.В., Старков Г.В. Полярные сияния и рассеяние радиоволн. Л.: Наука, 1987. 237 с.
- 5. Moorcroft D. R.// J. Geophys. Res. 1987. V. 92, No. A8. P. 8723.
- Понятов А. А., Урядов В. П., Батухтин В. И. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42, № 12. С. 1136.
- Урядов В. П., Вертоградов Г. Г., Вертоградов В. Г. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2004. Т. 47, № 9. С. 722.
- Урядов В. П., Вертоградов Г. Г., Вертоградова Е. Г. // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 1. С. 1.
- 9. Chisham G., Lester M., Milan S. E., et al. // Surveys in Geophysics. 2007. V. 28, No. 1. P. 33.

О. И. Бернгардт, В. П. Лебедев, К. А. Кутелев и др.

- Potekhin A. P., Berngardt O. I., Kurkin V. I., et al. // Proc. of SPIE 3983. Sixth Intern. Symp. Atmospheric and Ocean Optics. 19 November 1999. P. 328.
- Berngardt O. I., Zolotukhina N. A., Oinats A. V. // Earth, Planets and Space. 2015. V. 67. Art. no. 143.
- Жеребцов Г. А., Заворин А. В., Медведев А. В. и др. // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47, № 11. С. 1 339.
- 13. Potekhin A. P., Medvedev A. V., Zavorin A. V., et al. // Cosmic Res. 2008. V. 46, No. 4. P. 347.
- 14. Золотухина Н. А., Бернгардт О. И., Шпынев Б. Г. // Геомагнетизм и аэрономия. 2007. Т. 47, № 3. С. 364.
- 15. Гркович К.В., Бернгардт О.И. // Солнечно-земная физика. 2008. № 13. С. 3.
- 16. Berngardt O. I., Voronov A. L., Grkovich K. V. // Radio Science. 2015. V. 50, No. 6. P. 486.
- Gillies R. G., Hussey G. C., Sofko G. J., et al. // J. Geophys. Res. 2009. V. 114, No. A07. Art. no. A07305.
- 18. Berngardt O. I., Kutelev K. A., Potekhin A. P. // Radio Sci. 2016. V. 51, No. 10. P. 1703.
- Bristow W. A., Hampton D. L., Otto A. // J. Geophys. Res. Space Physics. 2016. V. 121, No. 2. P. 1349.
- 20. http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp.
- 21. Foster J.C., Erickson P.J. // Geophys. Res. Lett. 2000. V. 27, No. 19. P. 3177.
- 22. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. М.: Радио и связь, 1993. 416 с.
- 23. Лебедев В. П. Развитие диагностических возможностей Иркутского радара некогерентного рассеяния для решения задач контроля космических аппаратов и проведения активных космических экспериментов: Дисс...к.ф.-м. н. Иркутск: ИСЗФ СО РАН, 2015. 118 с.
- 24. Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука, 1980. 306 с.
- 25. Bilitza D., Altadill D., Zhang Y., et al. // J. Space Weather. 2014. V. 4, No. A07. P. 1.
- 26. Bartels R. H., Beatty J. C., Barsky B. A. An introduction to splines for use in computer graphics and geometric modeling. Los Altos, California: Morgan Kaufmann, 1987. 476 p.
- 27. Butcher J. C. Numerical methods for ordinary differential equations. Chichester, England: John Wiley, 2003. 538 p.
- Hairer E., Nörsett S. P., Wanner G. Solving ordinary differential equations I: Nonstiff problems. Berlin: Springer Verlag, 1993. 528 p.
- 29. Thébault E., Finlay C., Toh H., et al. // Earth, Planets and Space. 2015. V. 67. Art. no. 158.
- Насыров А. М. Рассеяние радиоволн анизотропными ионосферными неоднородностями. Казань: Изд-во КГУ, 1991. 149 с.
- Гркович К. В. Моделирование характеристик сигнала среднеширотного когерентного эха по данным Иркутского радара некогерентного рассеяния: Дисс...к. ф.-м. н. Иркутск: ИСЗФ СО РАН, 2016. 108 с.
- 32. Farley D. T., Ierkic H. M., Fejer B. G. // J. Geophys. Res. 1981. V. 86, No. 3. P. 1467.
- 33. Hairstone M. R., Heelis R. A. // Techn. Report. 1993. PL-TR-93-2036.
- 34. Chisham G., Yeoman T. K., Sofko G. J. // Ann. Geophys. 2008. V. 26, No. 4. P. 823.

Поступила в редакцию 5 декабря 2016 г.; принята в печать 30 мая 2017 г.

FIRST JOINT OBSERVATIONS OF RADIO AURORA AT THE VHF AND HF RADARS OF THE ISTP SB RAS

O. I. Berngardt, V. P. Lebedev, K. A. Kutelev, D. S. Kushnarev, and K. V. Grkovich

Currently, two modern radars for diagnosis of the ionosphere by the radio-wave backscattering method, namely, the Irkutsk incoherent scatter radar at VHF (IISR, 154–162 MHz) and the Ekaterinburg coherent radar at HF (ECR, 8–20 MHz) are operated at the Institute of Solar-Terrestrial Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ISTP SB RAS). The paper analyzes the results of joint observations of strong scattering (radio aurora) on June 8, 2015. To determine the geographical location of the radio aurora, we developed original methods that take into account both the features of the radio-wave propagation and the features of the radar antenna systems. It is shown that there are areas where the spatial location of the HF and VHF radio aurora can coincide. This permits using the radars as a single complex for diagnosis of the characteristics of small-scale high-latitude irregularities in the ionospheric E and F layers. A comparative analysis of the characteristics and temporal dynamics of the radio-aurora region in the HF and VHF bands is performed. Using the DMSP satellite data it has been shown that the dynamics of radio aurora during this experiment at the ECR radar can be related with the spatial dynamics of the localized area with high electric field, which moves from high to equatorial latitudes. It is found that due to the broader field of view, radio aurora at the ECR HF radar was stably observed 6–12 min earlier than at the IISR VHF radar. This permits using the ECR radar data for prediction of radio aurora at the IISR radar.