

УДК 537.876.23: 551.510.535 О. В. ЧАРКИНА

Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: charkina@ian.kharkov.ua

О ВОЗМОЖНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ С ПОМОЩЬЮ ПАНОРАМНЫХ РИОМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Предложена методика восстановления пространственного распределения индекса мерцаний радиоизлучения дискретных космических источников в F-слое полярной ионосферы по данным синхронных наблюдений нескольких панорамных ВЧ риометров северного полушария. В качестве примера приведены результаты измерений, выполненных с помощью двух многолучевых риометрических комплексов, расположенных в обсерваториях Гакона и Покер Флэт (Аляска, США). Для просвечивания ионосферы использовано излучение наиболее мощных точечных космических радиоисточников: Кассиопея А, Лебедь А, Телец А и Дева А. Продемонстрировано влияние авроральной возмущенности на величину индекса мерцаний. Рассмотрена перспектива применения разработанной методики в европейской части Арктического региона, где расположена значительная часть действующих панорамных риометров.

Ключевые слова: риометр, радиопросвечивание ионосферы, эффект мерцаний, индекс мерцаний, авроральный овал, дискретные космические источники, френелевские неоднородности, билинейная интерполяция, триангуляция Делоне

1. Введение

Панорамные ВЧ риометры представляют собой радиоприемные устройства, включающие многолучевые фазированные антенные системы и выходные радиометры (см. [1]). Такие инструменты применяются в мировой практике для мониторинга пространственно-временного распределения поглощения космического электромагнитного фона в нижней ионосфере. В рамках современных моделей атмосферного газа эти измерения позволяют отслеживать возрастание температуры электронов во время возмущений полярной ионосферы. В настоящее время существует широкая сеть таких устройств, расположенных в Арктике и Антарктиде. Большинство из них работают на частоте 38.2 МГц. С полным перечнем таких устройств можно ознакомиться на сайте Ланкастерского университета <<http://www.dcs.lancs.ac.uk/iono/cgi-bin/riometers>>.

В работах [2, 3] исследована возможность проведения регулярных наблюдений ионосферных мерцаний дискретных космических источников (ДКИ) с использованием современных риометрических ВЧ комплексов. По данным инструмента Покер Флэт (65°06' с. ш, 147°30' з. д.), расположенного на Аляске, показана возможность надежной одновременной регистрации мерцаний трех наиболее мощных ДКИ северного полушария (Кассиопея А, Лебедя А, и Девы А).

Как известно [4, 5], основной вклад в эффект мерцаний вносят неоднородности электронной концентрации с поперечными к лучу зрения размерами порядка зоны Френеля, $\Lambda_{\text{Фр}} = \sqrt{\lambda r_0}$. Здесь λ – длина радиоволны, r_0 – расстояние до рассеивающей области. Следует также отметить, что протяженные космические источники с угловыми размерами θ , превышающими угловой размер зоны Френеля $\theta_{\text{Фр}} = \sqrt{\lambda/r_0}$, не мерцают [4, 5] в силу некогерентного сложения полей, приходящих в точку наблюдения от разных областей таких источников. Продемонстрирована методика восстановления пространственного спектра и скорости движения ионосферных неоднородностей. Удалось оценить величину индекса мерцаний указанных ДКИ и обнаружить ее возрастание вследствие искусственной турбулизации ионосферы под действием излучения мощного нагревного стенда NIPAS, располагавшегося вблизи обсерватории Покер Флэт. В работе [6] теоретически и экспериментально исследованы эффекты мерцаний и дополнительного поглощения излучения ДКИ в ионосфере, модифицированной мощным КВ нагревом. Обсуждены также результаты двух специальных измерительных кампаний (в феврале и октябре 2008 г.), проведенных с использованием наиболее мощного в мире стенда HAARP, Аляска, США, (<http://www.haarp.alaska.edu>). В качестве приемного устройства был задействован новый панорамный риометр, расположенный в непосредственной

близости от нагревного стенда в пос. Гакона, ($62^{\circ}23'$ с. ш, $145^{\circ}09'$ з. д.). В ходе этих экспериментов искусственно возмущенная ионосферная область просвечивалась излучением двух источников, Кассиопея А и Лебедь А. Такие эксперименты позволили исследовать особенности мерцаний ДКИ на естественных и искусственных плазменных неоднородностях френелевских масштабов в F-слое полярной ионосферы при вертикальном и наклонном облучении ионосферы нагревным стендом. Предложенная методика дала возможность восстановить дополнительное поглощение и возрастание электронной температуры внутри области D-слоя, нагретой мощным ВЧ передатчиком.

Настоящая работа расширяет возможности панорамной риометрической диагностики околоземной плазмы с использованием метода радиопросвечивания ионосферы излучением ДКИ. Ее целью является разработка методики восстановления пространственного распределения индекса мерцаний в ионосфере над Аляской по данным синхронных наблюдений двух риометров, расположенных в обсерваториях Гакона и Покер Флэт. В качестве источников пробного излучения выбраны наиболее мощные в северном полушарии ДКИ. Разработан алгоритм визуализации пространственного распределения индекса мерцаний в субавроральном регионе, обнаружен заметный рост интенсивности ионосферных флуктуаций вблизи области авроральных возмущений. Обсуждены перспективы применения предложенной методики для исследования области ионосферы над Северной Европой, где расположена основная часть риометрических комплексов Арктического региона.

2. Наблюдение ДКИ с одновременным использованием двух панорамных ВЧ риометров Гакона и Покер Флэт

Кратко рассмотрим методику проведения измерений. В качестве источников диагностического излучения выбраны 4 наиболее мощных в ВЧ диапазоне приполярных ДКИ: Кассиопея А, Лебедь А, Телец А и Дева А. В табл. 1 указаны их характерные угловые размеры (компактные детали в ДКИ Кассиопея А и Телец А можно не учитывать, так как плотность потока их радиозлучения на частоте 38.2 МГц не превышает оши-

Таблица 1. Характерные угловые размеры дискретных космических источников

ДКИ	Угловой размер
Кассиопея А	$\sim 5'$
Лебедь А	$\sim 2'$
Телец А	$\sim 4'$
Дева А	$\sim 7'$

бок измерений), которые значительно больше углового размера $\theta_{\text{Фр}}^{\text{МП}} \sim 1.5''$ зоны Френеля, соответствующей рассеянию на межпланетной плазме ($r_0 \sim 1$ а. е.). В то же время масштаб зоны Френеля, соответствующей ионосферным высотам, $\theta_{\text{Фр}}^{\text{И}} \sim 17'$, значительно превышает угловой размер тех же источников. Это означает, что эффектами мерцаний излучения ДКИ на флуктуациях межпланетной плазмы в солнечном ветре можно пренебрегать, а вариации интенсивности принимаемых сигналов заведомо связывать только с ионосферными неоднородностями.

Фазированная антенная решетка (ФАР) риометра Покер Флэт состоит из 16×16 пар скрещенных горизонтальных симметричных диполей. На рис. 1 в горизонтальной системе небесных координат показана диаграмма направленности (ДН) этого устройства, состоящая из 256 лучей, перекрывающих всю небесную полусферу над риометром. Здесь нанесены также географический NS и магнитный $N_m S_m$ небесные меридианы, полюс мира P и траектории движения ДКИ Кассиопея А, Лебедь А, Телец А и Дева А по небесной полусфере. Точками вдоль каждой траектории отмечены часовые интервалы движений этих источников по небесной сфере. С более полным описанием этой ФАР можно ознакомиться в работах [2, 3].

Аналогичным образом построен риометр в обсерватории Гакона. Отличие состоит в размерах антенной решетки, состоящей из 8×8 пар скрещенных горизонтальных симметричных диполей. Система фазирования этого устройства формирует 64-лучевую ДН.

На рис. 2 на контурную карту Аляски жирными точками нанесены риометрические комплексы Гакона и Покер Флэт, а многоугольниками – проекции точек пересечений лучей зрения из этих пунктов на регистрируемые ДКИ с уровнем ионосферы $Z = 250$ км. Для каждого источника

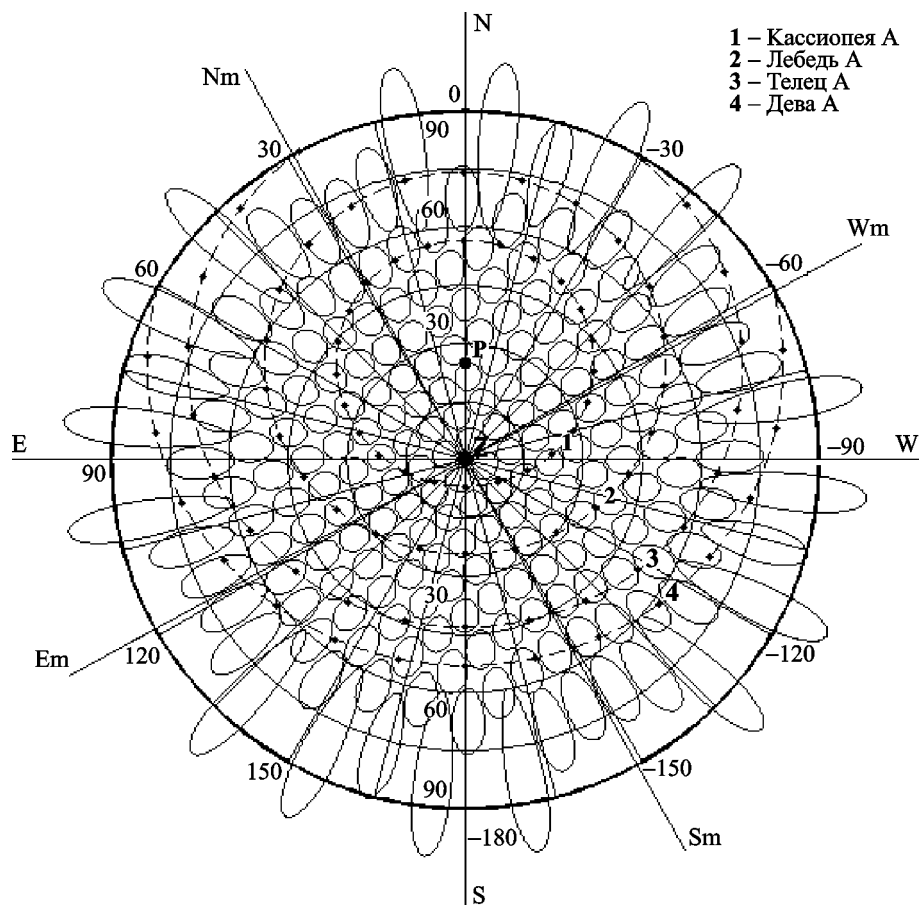


Рис. 1. ДН многолучевого КВ риометра Покер Флэт

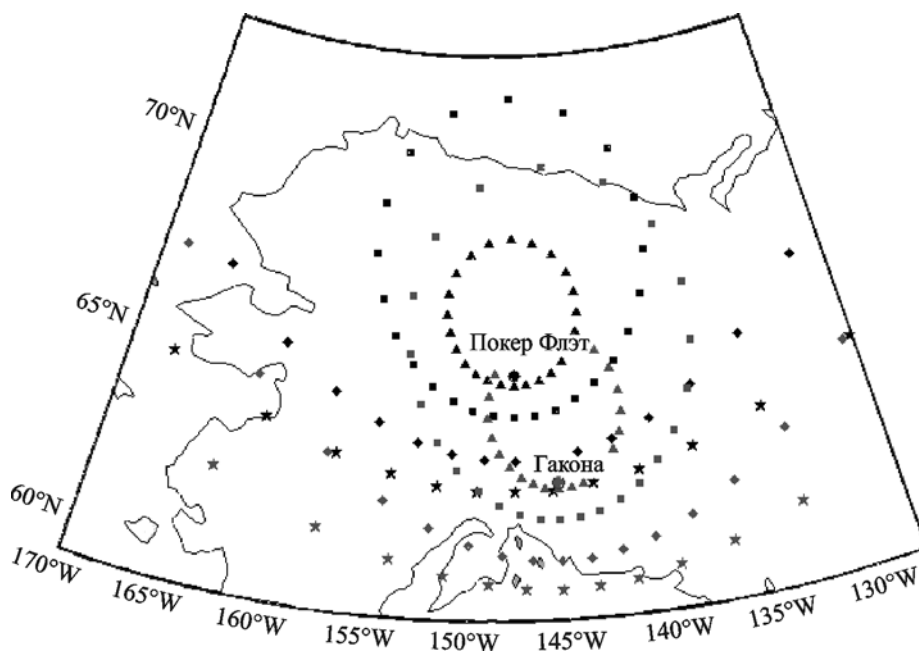


Рис. 2. Проекция точек пересечений лучей зрения риометров Гакона и Покер Флэт на ДКИ с ионосферой на высоте $Z = 250$ км

такие проекции отмечены с временным интервалом в один час. Для риометра Гакона использован серый цвет всех обозначений, для Покер Флэт – черный. Треугольники соответствуют ДКИ Кассиопея А, квадраты – Лебедь А, ромбы – Телец А и звездочки – Дева А.

Выходными устройствами риометрических установок являются радиометры, позволяющие отслеживать вариации интенсивности принятого излучения с темпом отсчета 1 с для каждого антенного луча. На рис. 3 для примера представлена суточная запись выходного сигнала риометра Покер Флэт в одном из лучей, через который проходит ДКИ Кассиопея А, 22 февраля 2008 г. В приведенных данных отчетливо видны плавные суточные изменения интенсивности галактического фона. Резкое возрастание среднего уровня и флуктуаций соответствует прохождению источника Кассиопея А через ДН риометра. Значения интенсивности $I(t)$ отложены в относительных единицах, соответствующих отсчетам аналого-цифрового преобразователя.

3. Обработка данных измерений

Кратко рассмотрим методику обработки данных риометрических наблюдений, с подробным описанием которой можно ознакомиться в работе [2]. Полагалось, что интенсивность сигнала $I(t)$ на выходе риометра при наблюдении i -го источника может быть представлена в виде

$$I(t) = G(\alpha_i(t), \psi_i(t))I_i(t) + I_B(t),$$

где G – ДН по мощности луча риометра, в котором наблюдается ДКИ; $\alpha_i(t), \psi_i(t)$ – текущие координаты источника; $I_i(t)$ и $I_B(t)$ – текущие

интенсивности излучения источника и космического фона соответственно. В процессе последующей обработки из записи исключался вклад космического фона $I_B(t)$ и ДН риометра G , а затем определялся индекс мерцаний [6–8]:

$$\beta_i^2 = \frac{\langle \delta I_i^2(t) \rangle}{\langle I_i(t) \rangle^2}.$$

Здесь угловые скобки означают статистическое усреднение, i – номер источника в последовательности: Кассиопея А, Лебедь А, Телец А и Дева А.

4. Методика восстановления пространственного распределения индекса мерцаний в верхней ионосфере и результаты наблюдений

Приведем алгоритм восстановления пространственного распределения индекса мерцаний в F-слое полярной ионосферы на примере данных обсерваторий Покер Флэт и Гакона 22 февраля 2008 г. При синхронном просвечивании ионосферы излучением четырех ДКИ с использованием двух риометров одновременно было получено восемь точек для расчета индекса мерцаний в ионосфере. Затем данное множество точек разбивалось на треугольники. Для этого применялась триангуляция Делоне [9] так, что полученные в результате ее применения треугольники являются наиболее близкими к равносторонним, что повышает точность последующей интерполяции. Далее, с использованием этих точек в качестве узлов билинейной интерполяции [10] было восстановлено распределение индекса мерцаний β^2 над Аляской. Этот метод является обобщением ли-

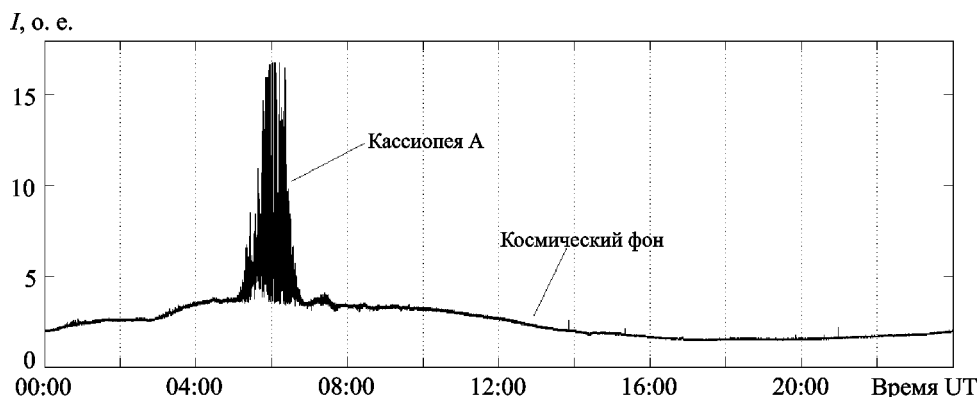


Рис. 3. Суточная запись выходного сигнала в одном из лучей риометра Покер Флэт

нейной интерполяции для функций двух переменных, поэтому представляется наиболее простым в использовании. Ключевая идея его заключается в том, чтобы провести обычную линейную интерполяцию сначала в одном направлении, затем в другом. Иллюстрация результатов применения данного алгоритма приведена на рис. 4. Здесь серой градиентной заливкой на карту Аляски спроецирована область с восстановленным распределением индекса мерцаний в F-слое ионосферы. В каждой расчетной точке эта величина вычислялась на временном интервале 05:57:30 – 06:02:30 UT. Штриховой линией показана внешняя граница северного аврорального овала, который, как известно (см., например, [11]), представляет собой область высыпания высокоэнергетичных электронов и протонов из радиационных поясов Земли в верхнюю атмосферу вдоль магнитных силовых линий. При спокойных геомагнитных условиях овал представляет собой тонкое кольцо, ширина которого составляет $2 \div 3$ градуса, а центр смещен на ночную сторону относительно геомагнитного полюса. Во время повышения уровня магнитной активности область овала деформируется за счет более быстрого расширения внешнего предела к экватору в полуденные и послеполуденные часы. Зона максимальной авроральной возмущенности расположена посередине между внешней и внут-

ренней границами овала. Как видно из рис. 4, значение индекса мерцаний увеличивается именно в этом направлении. Это свидетельствует о влиянии уровня авроральных возмущений на неоднородную структуру F-слоя ионосферы. По-видимому, увеличение энергии и числа высыпающихся частиц приводит и к росту интенсивности ионосферных неоднородностей разных масштабов, в том числе и френелевских.

Рассмотрим перспективу применения разработанной методики для исследования ионосферы над севером европейского континента. В настоящее время в этом регионе проводятся наиболее активные исследования полярной ионосферы. Здесь сосредоточена большая часть арктических ВЧ риометров. Расположены они в Исландии, Гренландии, Норвегии, Финляндии и на о. Свалбард. ДН этих инструментов перекрывают всю область ионосферы над Скандинавией. На рис. 5 жирными точками показано восемь риометрических комплексов. Линиями нанесены суточные траектории движения точек пересечений лучей зрения на ДКИ каждого из риометров с уровнем ионосферы $Z = 250$ км. Как видно из рисунка, применение разработанной методики к данным синхронных наблюдений этих инструментов позволит исследовать поведение френелевских неоднородностей полярной ионосферы в полосе дол-

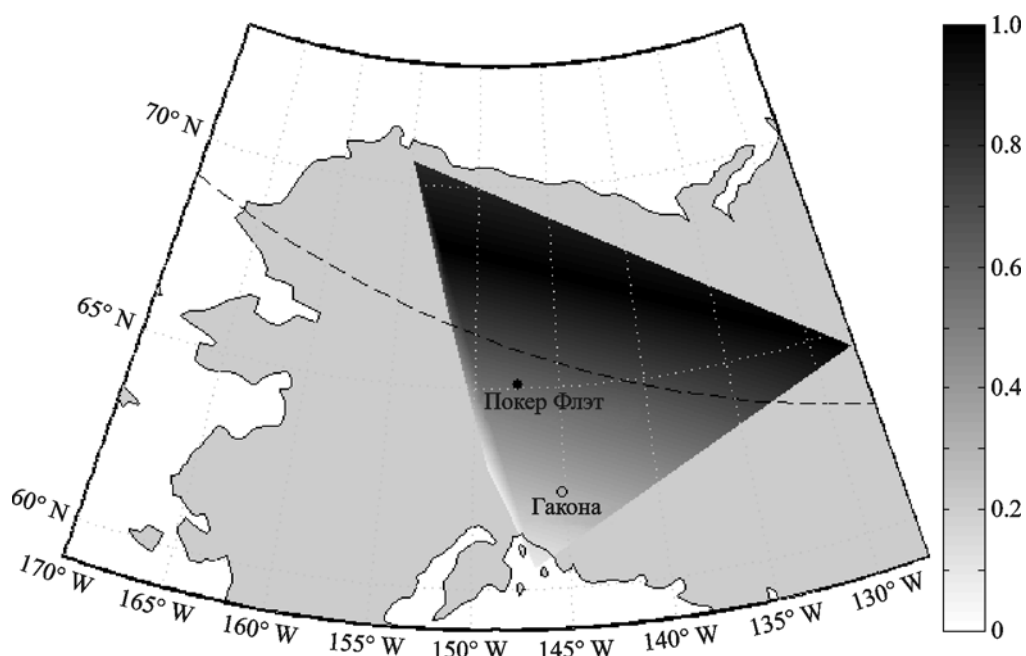


Рис. 4. Карта распределения индекса мерцаний в слое F ионосферы над Аляской в 06:00 UT 22 февраля 2008 г.

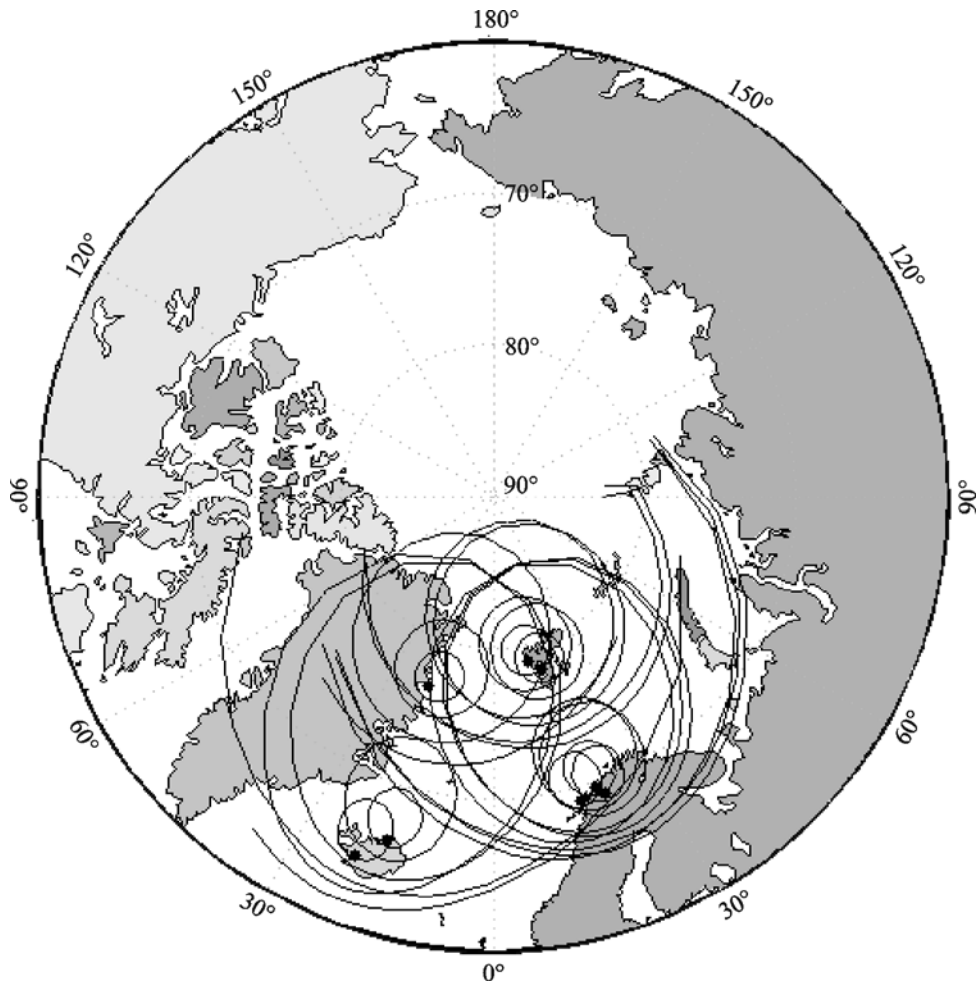


Рис. 5. Карта расположения риометрических комплексов Северной Европы

гот от -60° до 60° . В эту область попадают обе границы овала полярных сияний, поэтому распределение индекса мерцаний можно восстанавливать внутри области повышенной авроральной активности.

5. Выводы

В настоящей работе предложена методика проведения диагностики возмущенности ионосферы по данным многопунктовых риометрических наблюдений. Она позволяет систематически восстанавливать пространственное распределение значений индекса мерцаний ДКИ в F-слое, отображая текущую возмущенность верхней ионосферы.

В результате проведенного исследования ионосферы над Аляской продемонстрировано заметное увеличение индекса мерцаний ДКИ с при-

ближением к области повышенной авроральной активности.

Благодаря тому, что регистрация данных панорамными ВЧ риометрами ведется систематически и непрерывно, разработанный алгоритм можно применять для восстановления не только пространственного, но и временного распределения индекса мерцаний. При этом станет возможным отслеживать влияние динамики аврорального овала на неоднородную структуру F-области ионосферы.

Описанная методика может быть успешно применена для наблюдений за поведением френелевских неоднородностей над севером Европы, где сеть риометров гораздо плотнее, чем на Аляске. ДН этих инструментов перекрывают северную высокоширотную ионосферу на долготах от -60° до 60° . Это позволяет проводить регулярные наблюдения за неоднородной струк-

турой F-слоя и отслеживать реакцию френелевских неоднородностей на изменение уровня авроральных возмущений.

Регулярный мониторинг мерцаний излучения ДКИ с помощью сети ВЧ риометров дает возможность исследовать вариации ионосферных неоднородностей в высокоширотной ионосфере, не прибегая к спутниковым и радарным методам.

Автор работы считает своим приятным делом поблагодарить проф. Ю. М. Ямпольского за постановку задачи риометрической диагностики ионосферы, В. Г. Безродного за обсуждение полученных результатов и ценные советы, а также проф. Б. Воткинса за предоставленные данные риометрических наблюдений на Аляске. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке ведомственных НИР "Ятаган-2" (№ 0111U000063) и "Шницберген-11" (№ 0111U003977).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Detrick D. L. and Rosenberg T. J. A phased-array radio-wave imager for studies of cosmic noise absorption // Radio Sci. – 1990. – Vol. 25, No. 4. – P. 325–338.
2. Безродный В. Г., Воткинс Б., Галушко В. Г., Гровс К., Кащеев А. С., Чаркина О. В., Ямпольский Ю. М. Наблюдение ионосферных мерцаний дискретных космических источников с помощью панорамного ВЧ риометра // Радиофизика и радиоастрономия. – 2007. – Т. 12, № 3. – С. 242–260.
3. Bezrodny V. G., Charkina O. V., Galushko V. G., Groves K., Kashcheyev A. S., Watkins B., Yampolski Y. M., and Murayama Y. Application of an imaging HF riometer for the observation of scintillations of discrete cosmic sources // Radio Sci. – 2008. – Vol. 43, RS 6007, doi:10.1029/2007RS0037.
4. Рытов С. М., Кравцов Ю. А., Татарский В. И. Введение в статистическую радиофизику, часть 2. – М.: Наука, 1978. – 463 с.
5. Гершман Б. Н., Ерухимов Л. М., Яшин Ю. Я. Волновые явления в ионосферной и космической плазме. – М.: Наука, 1984. – 392 с.
6. Безродный В. Г., Чаркина О. В., Ямпольский Ю. М., Воткинс Б., Гровс К. Исследование стимулированных ионосферных мерцаний и поглощения излучения дискретных космических источников с помощью панорамного ВЧ риометра // Радиофизика и радиоастрономия. – 2010. – Т. 15, № 2. – С. 151–163.
7. Crane R. K. Ionospheric Scintillation // Proc. IEEE. – 1977. – Vol. 65, No. 2. – P. 180–204.
8. Bovkoon V. P. and Zhouck I. N. Scintillations of cosmic radio sources in the decametre waveband // Astrophys. Space Sci. – 1981. – Vol. 79. – P. 165–180.
9. Скворцов А. В. Триангуляция Делоне и ее применение. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 2002. – 128 с.
10. Канатников А. Н., Крищенко А. П., Четвериков В. Н. Дифференциальное исчисление функций многих переменных: Учебник для вузов / Под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. – 456 с.
11. Ришбет Г., Гарриот О. К. Введение в физику ионосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 304 с.

О. В. Чаркина

Радиоастрономічний інститут НАН України,
вул. Червонопрапорна, 4, м. Харків, 61002, Україна

ЩОДО МОЖЛИВОСТІ ВІДНОВЛЕННЯ ПРОСТОРОВОГО РОЗПОДІЛУ ІОНОСФЕРНИХ НЕОДНОРІДНОСТЕЙ ЗА ДОПОМОГОЮ ПАНОРАМНИХ РІОМЕТРИЧНИХ СИСТЕМ

Пропонується методика відтворення просторового розподілу індексу мерехтіння радіовипромінювання дискретних космічних джерел у F-шарі полярної іоносфери за даними синхронних спостережень кількох панорамних ВЧ риометрів північної півкулі. Як приклад наведено результати вимірювань, виконаних за допомогою двох багатопроменевих риометричних комплексів, розташованих в обсерваторіях Гакона та Покер Флет (Аляска, США). Для просвічування іоносфери використано випромінювання найбільш потужних радіоджерел: Касіопея А, Лебідь А, Телець А та Діва А. Продемонстровано вплив авроральної збуреності на значення індексу мерехтіння. Розглянуто перспективу застосування розробленої методики в європейській частині Арктичного регіону, де розташована значна частина діючих панорамних риометрів.

О. В. Чаркина

Institute of Radio Astronomy, National Academy
of Sciences of Ukraine,
4, Chervonopraporna St., Kharkiv, 61002, Ukraine

ON RECOVERY POSSIBILITY FOR THE SPATIAL DISTRIBUTION OF IONOSPHERIC INHOMOGENEITIES WITH THE USE OF IMAGING RIOMETERS

The technique has been suggested for recovering the spatial distribution of the scintillation index for radio emission of discrete cosmic sources in the polar ionospheric F-layer using the data of simultaneous observations from the several imaging HF riometers located in the Northern Hemisphere. As an example, the results of measurements with the use of multibeam riometric facilities located at Gakona and Poker Flat Observatories (Alaska, USA) are presented. The emission from the four strongest discrete cosmic sources, namely, Cassiopeia A, Cygnus A, Taurus A and Virgo A, has been selected for sounding the ionosphere. The influence of the auroral activity on the scintillation index value is shown. Prospects for application has been considered for the developed technique in the European part of the Arctic region where the majority of operating imaging riometers is located.

Статья поступила в редакцию 16.03.2012