**Министерство образования и науки Российской Федерации**

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»**

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ

КАФЕДРА РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Направление: 011800.62 — радиофизика

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**

(Бакалаврская работа)

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛОВЫХ РАЗМЕРОВ ПЯТНА И ИНТЕНСИВНОСТИ ИСКУССТВЕННОГО СВЕЧЕНИЯ ИОНОСФЕРЫ, СТИМУЛИРОВАННОГО МОЩНЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ СТЕНДА «СУРА»

Работа завершена:
"___"_____2015 г. _____(Д.В. Никифоров)

Работа допущена к защите:
Научный руководитель
к.ф.-м.н., доцент
"___"_____2015 г. _____(И.А. Насыров)

Заведующий кафедрой
д.ф.-м.н., профессор
"___"_____2015 г. _____(М.Н. Овчинников)

**Казань — 2015**

# Содержание

Введение……3

Глава 1. Распространение радиоволн в ионосфере ……..6

1.2 Искусственное радиоизлучение ионосферы……7

1.3 Искусственное оптическое свечение…….....8

Глава 2. Постановка эксперимента……11

2.1 Положение полярной звезды на кадре…….....13

2.2 Положение линий Север-Юг и Запад-Восток …….....15

2.3 Положение Зенита и построение азимутальной координатной сетки……..18

Глава 3. Интенсивность свечения пятна возмущенной области ионосферы……20

3.1 Координаты самой яркой точки в пятне……...20

3.2 Средняя яркость пикселей в пятне и темной области…….22

Заключение…….....28

Литература ……..29

Приложение 1…….....30

Приложение 2 ……..32

Приложение 3 ……..38

Приложение 4 ……..39

# Введение

Ионосфера – это плазменный слой в верхней атмосфере, на высотах от 60 до 1000 км (рис. 1). Плазма в ионосфере создается ультрафиолетовым излучением Солнца, по высоте она занимает несколько сотен километров. Максимум концентрации достигается в так называемом F-слое, на высоте около 300 км. Максимум концентрации составляет приблизительно $10^6$ электронов в 1 $см^{-3}$ , спадая в ночное время до $3*10^5$ электронов в 1 $см^{-3}$. Значение максимальной концентрации зависит от широты и изменяется с циклом активности Солнца. Ниже F-слоя, в E- и D-слоях, концентрация спадает, уменьшаясь до $10^3$ $см^{-3}$. Иногда концентрация E-слоя существенно увеличивается, его тогда называют E-спорадическим. D-слой существует только днем, в ночной период он исчезает.

Концентрация нейтральной компоненты плазмы (т.е. воздуха) в ионосфере изменяется приблизительно от $10^{16}$ $см^{-3}$ на высотах 50-60 км до $10^9$ $см^{-3}$ на высоте 300 км. Далее с высотой она постепенно спадает, становится незначительной, и плазма приближается к полностью ионизованной. В области, лежащей выше 1000 км, ионосфера плавно переходит в магнитосферу.

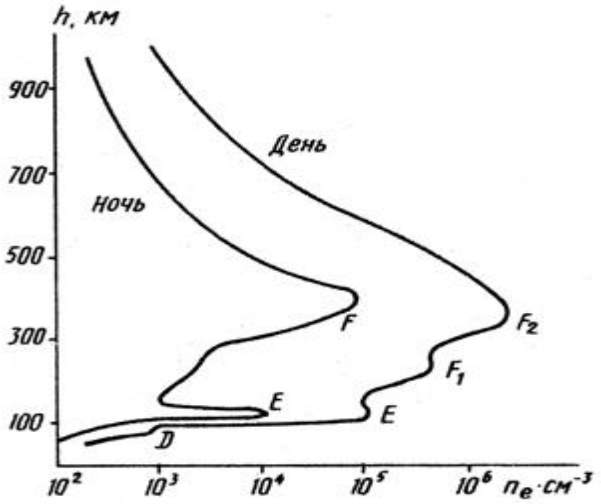



**Рис. 1.** Распределение концентрации плазмы в ионосфере в зависимости от высоты h. Максимум концентрации плазмы $N_{max}$ достигается в верхнем слое F на высоте $h \approx 300$ км. В дневное время $N_{max} \approx 10^6$ $см^{-3}$, в ночное время $N_{max} \approx 3*10^5$ $см^{-3}$. Слои E и D расположены на высотах 60 – 100 км. Нижний слой D (высота 60 – 80 км) существует только в дневное время

Воздействие на верхние слои ионосферы мощным КВ радиоизлучением может приводить к целому ряду эффектов, например: генерации различных плазменных мод, образованию неоднородностей плотности плазмы с масштабами от десятков сантиметров до десятков километров, генерации искусственного оптического и радиоизлучения, дополнительной ионизации и т.д. Изучение подобных эффектов происходит на нагревных стендах в ходе активных экспериментов. В настоящее время в мире существует несколько радиокомплексов, оснащенных оборудованием для создания и диагностики возмущений в ионосфере. Среди них: нагревный стенд «Сура» (р/п Васильсурск, Нижегородская область, Россия), EISCAT (Норвегия), HAARP (США), стенд в районе г. Аресибо США) [1].

**Актуальность проблемы**

Изучение природы эффектов воздействия КВ радиоизлучения на ионосферу является фундаментальной задачей физики плазмы, позволяющей исследовать закономерности возбуждения турбулентности магнитоактивной плазмы мощным высокочастотным электромагнитным полем, а также моделировать различные естественные процессы. Исследования проводятся с целью детального изучения поведения волн и частиц в околоземной плазме, моделирования естественных процессов в ионосфере и магнитосфере при различных внешних воздействиях. Задача диагностики ионосферных возмущений естественного и антропогенного характера выходит на первый план в вопросах дальнейшего развития систем наземной и спутниковой связи, а также космической безопасности. В этих вопросах также является актуальной задача разработки методов создания в ионосфере контролируемых возмущений с заданными параметрами, изучения возможностей управления космической погодой и дальним распространением радиоволн.

Исследования явлений, происходящих в ионосфере и магнитосфере при воздействии на околоземное космическое пространство мощных КВ радиоволн, неизменно вызывают значительный интерес ученых ряда стран, в том числе России, США, Швеции, Великобритании, Норвегии, Украины, Японии, Бразилии, Франции, Канады, Финляндии, Китая. В Российской Федерации подобными исследованиями занимаются в ФГБНУ НИРФИ, ННГУ, ФИ РАН им. П.Н. Лебедева, ИЗМИРАН, ИДГ РАН, Казанском (Приволжском) Федеральном университете, Южном федеральном университете, Институте Арктики и Антарктики (ААНИИ), ПГИ КНЦ РАН, НПО «Тайфун» и др. Следует отметить, что работы проходят в тесной кооперации как внутри Российской Федерации, так и с зарубежными партнерами.

Проблема воздействия на ионосферу мощным радиоизлучением, обсуждается на специальных секциях на ассамблеях URSI, COSPAR, Всероссийских конференциях по распространению радиоволн, специальных конференциях и симпозиумах [2].

**Постановка задачи**

Целью моей работы было определить координаты и угловые размеры пятна возмущенной области ионосферы. В связи с этим были поставлены следующие задачи. По полученным в ходе эксперимента изображениям ночного неба необходимо было найти:

- положение полярной звезды на кадре;
- положение линий Север-Юг и Запад-Восток;
- положение Зенита и построить азимутальную координатную сетку.

Предметом исследования послужил эксперимент, проведенный 26 августа 2014 года в Казанском Федеральном Университете по воздействию на ионосферу мощным радиоизлучением с использованием стенда «Сура» и магнитной обсерваторией КФУ.

# Глава 1. Распространение радиоволн в ионосфере

Ионосфера играет важную роль в распространении радиоволн. От F-слоя отражаются короткие радиоволны. Благодаря большой высоте слоя они распространяются на большие расстояния – до 2-3 тысяч километров. В E- и D-слоях распространяются длинные и средние волны. Вследствие наличия магнитного Земли ионосферная плазма анизотропна, что приводит к возникновению двух компонент радиоволн – обыкновенной (O) и необыкновенной (X).

Поглощение радиоволн, которое определяется соударениями электронов с нейтральными молекулами, происходит в основном в нижних слоях, на высотах 60 – 100 км, где плотность нейтральных частиц высока и соответственно высока частота соударений с электронов с ними. Нужно отметить, что в ночное время поглощение резко уменьшается вследствие исчезновения электронов в D-слое в результате рекомбинации.

***Нелинейные явления***. Благодаря малой концентрации электронов в ионосфере возникает возможность вызывать достаточно сильное локальное возмущение их распределения, используя сравнительно слабоинтенсивное воздействие. Именно это обстоятельство лежит в основе экспериментальных исследований физики ионосферной плазмы методом воздействия радиоволн.

Замечательная особенность плазмы, находящейся в магнитном поле, состоит в том, что, в отличие от обычных жидкостей и газов, в которых существует только один вид волн – звуковые, в плазме может существовать большое количество разнообразных волн, например:

- плазменные волны – продольные колебания нагретой электронной компоненты плазмы;
- ионно-звуковые волны – совместные продольные колебания электронов и ионов;

- верхнегибридные (ВГ) плазменные волны – электронные колебания поперек магнитного поля;
- бернштейновсие моды, связанные с многократным гиромагнитным резонансом,

и другие волны. Этим обусловлено чрезвычайно большое разнообразие нелинейных явлений в ионосферной плазме, возникающих при резонансном воздействии мощных радиоволн.

Изучение физических явлений в плазме методом воздействия радиоволнами на ионосферу ведется уже более 40 лет. Для исследования вызванных радиоволнами возмущений плазмы был разработан и использован широкий набор диагностической техники, включающей в себя разнообразные системы радиозондирования, комплексы многочастотных доплеровских измерений, радары некогерентного рассеяния (в том числе наиболее высокочувствительный в мире радар в Аресибо), специальные камеры и телескопы для оптических измерений, магнетометры и другие научно-измерительные приборы. Проводятся также прямые наблюдения со специально запущенных ракет и искусственных спутников [1].

## 1.2 Искусственное радиоизлучение ионосферы

В 1970-х годах Л.Стенфло предсказал, что воздействие на ионосферу мощной радиоволной должно привести к возникновению обратного радиоизлучения из ионосферы на частотах, существенно отличающихся от частоты возмущающей станции. Экспериментально это радиоизлучение – искусственное радиоизлучение ионосферы (ИРИ) – было обнаружено Б. Тиде, Г. Копкой и П. Штуббе в 1982 г. Установлено, что источники ИРИ находятся в возмущенной мощной радиоволной области. Излучение непрерывное и некогерентное. Кроме особых случаев, излучение идет на частотах более низких, чем частота возмущающей волны [1].

## 1.3 Искусственное оптическое свечение

При воздействии на ионосферу мощным коротковолновым радиоизлучением в области отражения образуются неоднородности электронной концентрации с размерами от десятков сантиметров до десятков километров. Диагностика крупномасштабной (более 0.5 км) структуры возмущённой мощной радиоволной области ионосферы осуществляется с помощью просвечивания ионосферы декаметровым радиоизлучением космических радиоисточников, с помощью ракурсного рассеяния радиоволн КВ и УКВ диапазонов, просвечивания возмущённой области УКВ сигналами низкоорбитальных спутников и геостационарных спутников, с помощью спутниковой радиотомографии, измерений электронной плотности при пролёте космических аппаратов и геофизических ракет через возмущённую область и над ней.

Как известно, оптическое излучение возникает в результате возбуждения соответствующих уровней атомов молекул и ионов при столкновениях с электронами, энергия которых превышает потенциал возбуждения соответствующих линий, а также может быть связно с появлением возбужденных атомов в результате диссоциативной рекомбинации молекул. Появление быстрых электронов связано с ускорением последних, плазменными волнами, возникающими при развитии различных параметрических неустойчивостей, вызванных накачкой *O*-поляризации. Одной из целей измерений искусственного оптического свечения является изучение крупномасштабной структуры возмущенной области, которая хорошо видна на зарегистрированных портретах ночного неба. Основные измерения проводятся в красной (630 нм) и зеленой (557.7 нм) линиях атомарного кислорода, связанных с излучением уровней O(1D) и O(1S) с энергиями возбуждения 1.96 и 4.17 эВ и радиационными временами жизни 107 с и 0.7 с, соответственно [2].

Информативным методом является измерение искусственной модуляции свечения ночного неба при модификации ионосферы мощными радиоволнами:

- ВЧ плазменные волны эффективно ускоряют электроны. Характерная энергия ускоренных электронов достигает 30 эВ, что превышает характерные энергии возбуждения уровней атомарного кислорода O($O(^1D)$) (1.96 эВ) и O($O(^1S)$) (4.17 эВ), и потенциалы ионизации атомарного кислорода $O$ (13.6 эВ) и молекулярного азота $N_2$ (15.6 эВ).
- при дезактивации уровней O($O(^1D)$) и O($O(^1S)$) генерируется видимый свет с длинами волн 630 нм и 557.7 нм (красная и зеленая линии) (рис. 2).

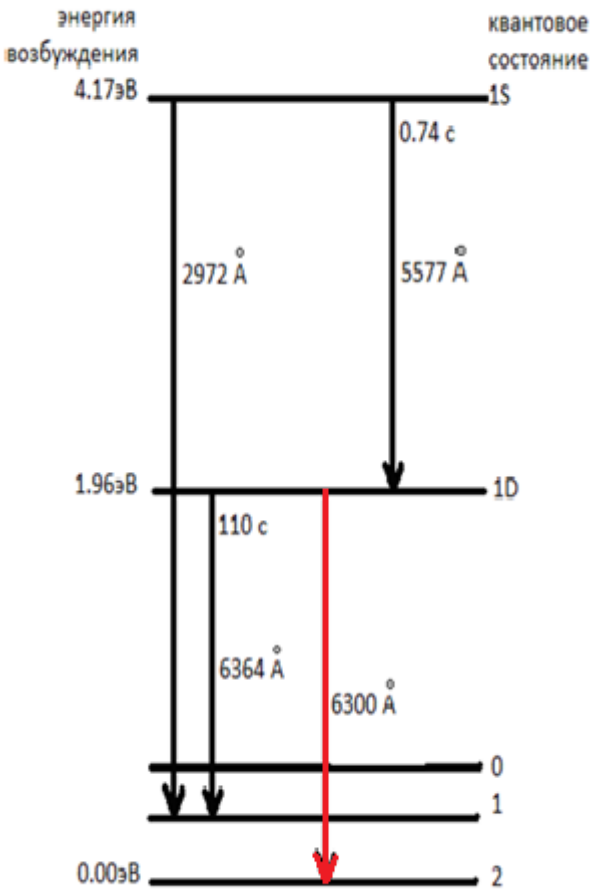



**Рис.2.** Схема переходов в атоме кислорода

Эффективным методом исследования крупномасштабной структуры возмущенной области является измерение искусственного оптического свечения ионосферы в линии O(1$D$) ($\lambda$ = 630 нм).

Красная линия – у нее очень низкий минимальный уровень возбуждения электронным ударом (1.96 эВ). Излучение в этой линии – переход $^1D_2$ -> $^3P_2$ - имеет большое время задержки: $\tau$ = 130 с. Поэтому существенное значение приобретает процесс гашения возбужденного атома за счет его столкновения с другими молекулами и атомами ионосферы. Отсюда следует, что интенсивность излучения красной линии существенно зависит от высоты. В частности, на высотах *F*-слоя (~ 300 км) гашение не является сильным, а в *E*-слое (~ 110 ÷ 130км) гашение практически подавляет красную линию излучения [4-5].

# Глава 2. Постановка эксперимента

**Экспериментальная компания** по исследованиям стимулированного свечения ионосферы проводились с использованием нагревного стенда «Сура», расположенным на р/п «Васильсурск» (Нижегородская область). Воздействие на ионосферу осуществлялось циклами: 3 мин – нагрев, 3 мин – пауза; либо 7 мин – нагрев, 4 мин – пауза. Частота возмущающего передатчика выбиралась исходя из ионосферных условий, определяемых при помощи ионозондов, и составляла 4,3-7 МГц.

Измерения оптического свечения, стимулированного мощным радиоизлучением стенда «Сура» проводились из двух пространственно-разнесённых пунктов на нескольких линиях оптического спектра: а) атомарный кислород – красная (630 нм) и зелёная (557,7 нм) линии; б) молекулярный азот – синяя (427,8 нм) линия; в) гидроксил – 834,2 нм.

Первый оптический измерительный пункт был организован непосредственно на р/п «Васильсурск». Регистрация проводилась при помощи набора фотометров с соответствующими светофильтрами, цифровой ПЗС-камерой S1C/079FP(FU) оснащенной светосильным объективом НС-2 с углом обзора 20°. Кроме этого на измерительном пункте был установлен Мобильный фотометрический комплекс КФУ (питающая оптика – телескоп Meade DeLux 16” со световым диаметром 400 мм и фокусным расстоянием 1800 мм; светоприемник – фотометр оригинальной конструкции, построенный на базе микроконтроллеров фирмы ATMEL, в качестве фотодетектора используется ФЭУ-100 с головкой усилителя-дискриминатора LA100AD).

Второй, вынесенный, измерительный пункт размещался на территории магнитной обсерватории Казанского федерального университета, расположенной в Зеленодольском районе Республики Татарстан (село Бело-Безводное, 55,95° с.ш., 48,48° в.д.) (далее п. «Магнитка»). На втором

измерительном пункте были размещены: мобильный фотометрический комплекс (МФК) КФУ в составе цифровой ПЗС-камеры S1C и светосильного объектива ЗИКАР-2М с углом обзора 3°; оптическая система регистрации пространственного распределения интенсивности атмосферной эмиссии атомарного кислорода в линии 630 нм ИСЗФ СО РАН (KEO Sentinel) с углом обзора 145°, специально доставленная из Иркутска для проведения измерений. Наведение МФК КФУ на возмущенную область из выносного измерительного пункта осуществлялась по специально разработанной, в рамках выполнения проекта, методике, описание которой размещено на Web-ресурсе Казанского федерального университета [7]. На всех фотометрических средствах, расположенных на п. «Магнитка» были установлены красные интерференционные светофильтры (630 нм) (рис. 3).

Ионосферные и погодные условия позволили провести синхронные измерения в двух пространственно-разнесённых пунктах искусственное свечение ионосферы на красной линии атомарного кислорода (630 нм), стимулированное мощным радиоизлучением стенда «Сура» в течение 2-х экспериментальных дней – 24 и 26.08.2014 г. Регистрация портретов ночного неба проводилась с выдержкой 30 с, размер кадров составлял 511×511 пикселей.

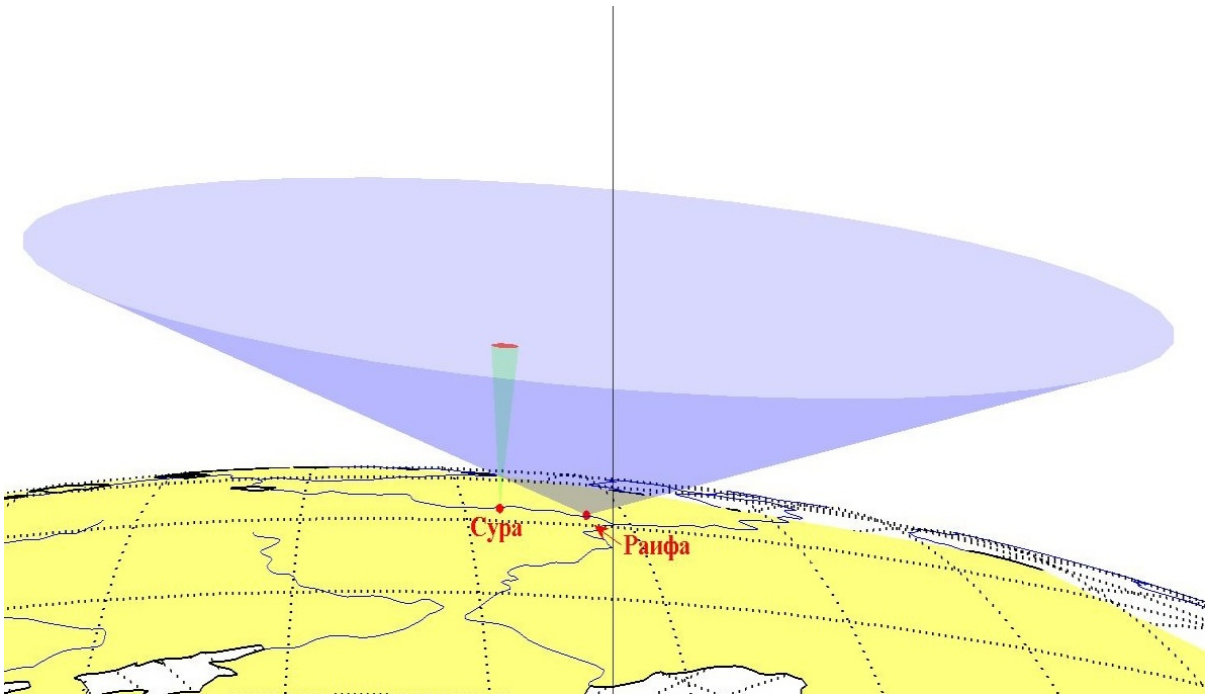



Рис.3. Расположение пунктов стенда «Сура» и магнитной обсерватории КФУ (Раифа). Малый конус означает мощное радиоизлучение стенда «Сура». Большой конус означает угол обзора камеры KEO 145°

Моей задачей было обработать изображения, полученные с камеры KEO (145°) во время эксперимента 26 августа 2014. По полученным изображениям ночного неба необходимо было найти:

- положение полярной звезды на кадре;
- положение линий Север-Юг и Запад-Восток;
- положение Зенита и построить азимутальную координатную сетку.

## 2.1 Положение Полярной звезды на кадре

Для того чтобы определить положение полярной звезды необходима пространственная и временная привязка портретов (изображений) ночного неба к небесным координатам и местному времени. Благодаря компьютерному планетарию Stellarium можно осуществить такую привязку [3].

Пространственная привязка была осуществлена тем, что мы знаем географические координаты расположение камеры KEO, которая регистрировала изображения. Временная привязка портретов ночного неба не

составляет труда, так как во время съемки очередного кадра фиксируется точное время. После этого, с помощью математического пакета Matlab и скрипта Sum_KEO (Приложение 1) можно просуммировать несколько кадров и увидеть движение звезд. Далее переводим с помощью соответствующих функций из гистограммы изображения в сам портрет ночного неба (приложение 3). Таким образом мы находим Полярную звезду, которая остается неподвижной. В настоящую эпоху Полярная находится менее чем в 1° от Северного полюса мира, и поэтому почти неподвижна при суточном вращении звёздного неба. Она очень удобна для ориентирования: направление на неё практически совпадает с направлением на север, а высота над горизонтом равна географической широте места наблюдения.[6]

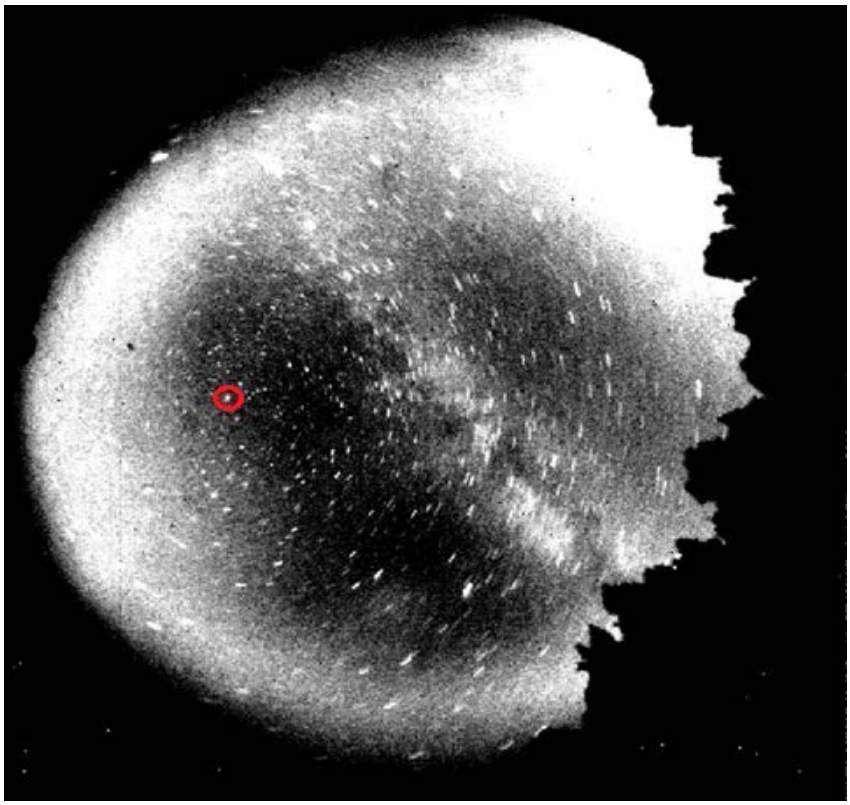


**Рис. 4.** Определено место положения Полярной звезды на кадре с помощью планетария Stellarium и скрипта Sum_KEO

## 2.2 Положение линий Север-Юг и Запад-Восток

После того как было определено положение Полярной звезды ставится задача определить и нанести на кадр линии Север-Юг и Запад-Восток. Для этого вновь был использован планетарий Stellarium (рис.5). На данном рисунке видно, что линия Север-Юг проходит не через Полярную звезду, а западнее на 1°. Следовательно, зная угол обзора камеры КЕО (145°) и размеры полученного изображения 511×511 пикселей (рис.4) можно узнать сколько составляет цена одного градуса. 1° составляет примерно 3 пикселя на изображении.

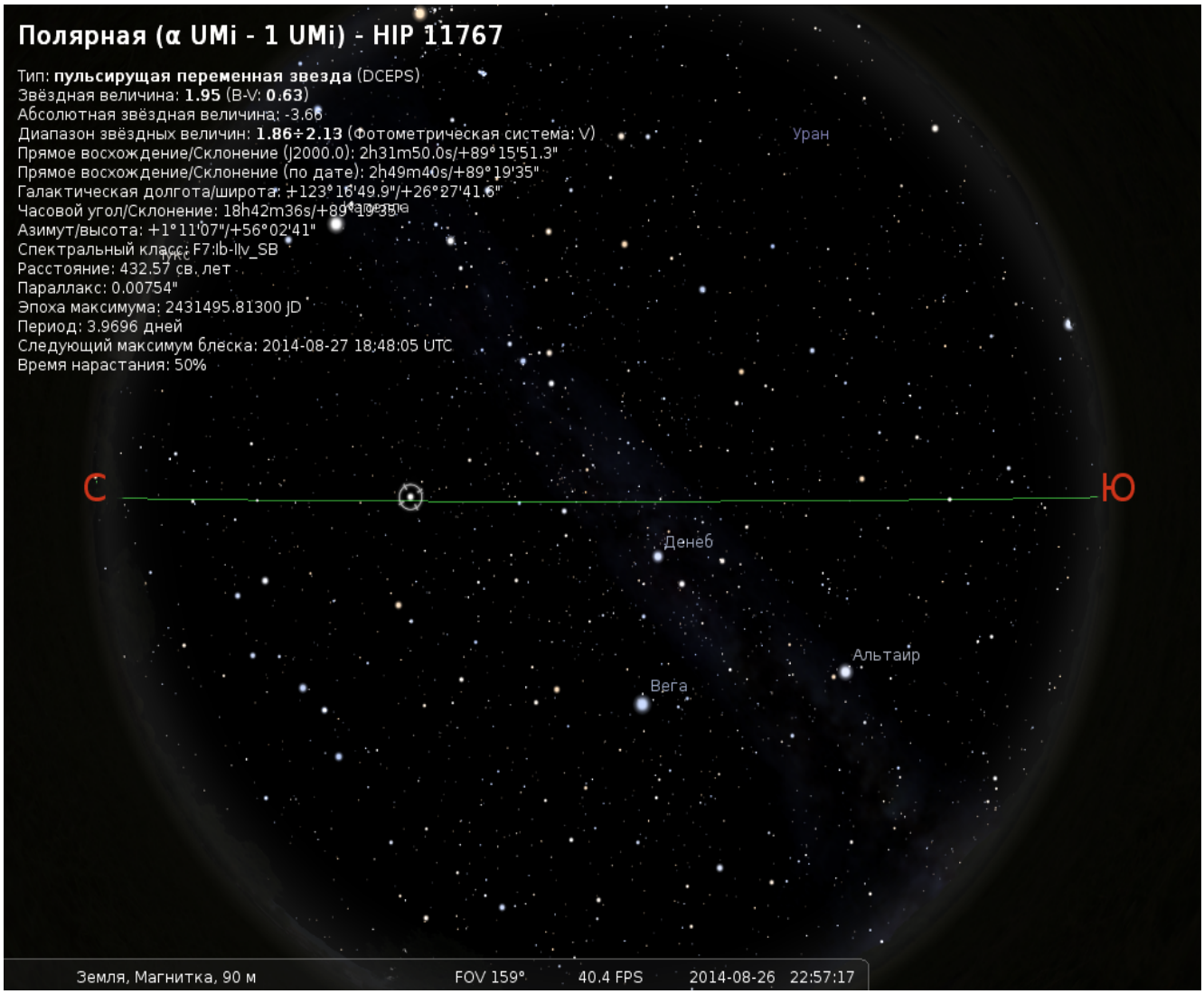



**Рис. 5.** Изображение со Stellarium

Следовательно, линию Север нужно рисовать на 3 пикселя ниже чем положение Полярная звезда.

Для того чтобы нарисовать линию Юг необходимо по Stellarium выбрать звезду, которая пересекает небесный меридиан строго перпендикулярно, затем найти эту звезду на кадре в тот момент, когда данная звезда пересекает меридиан. Следовательно, соединяя две точки, мы получим линию Север-Юг. Нарисовал ее с помощью программы Matlab и комбинации скриптов Sum_KEO (приложение 1) и test_plot (приложение 2) (рис. 6).

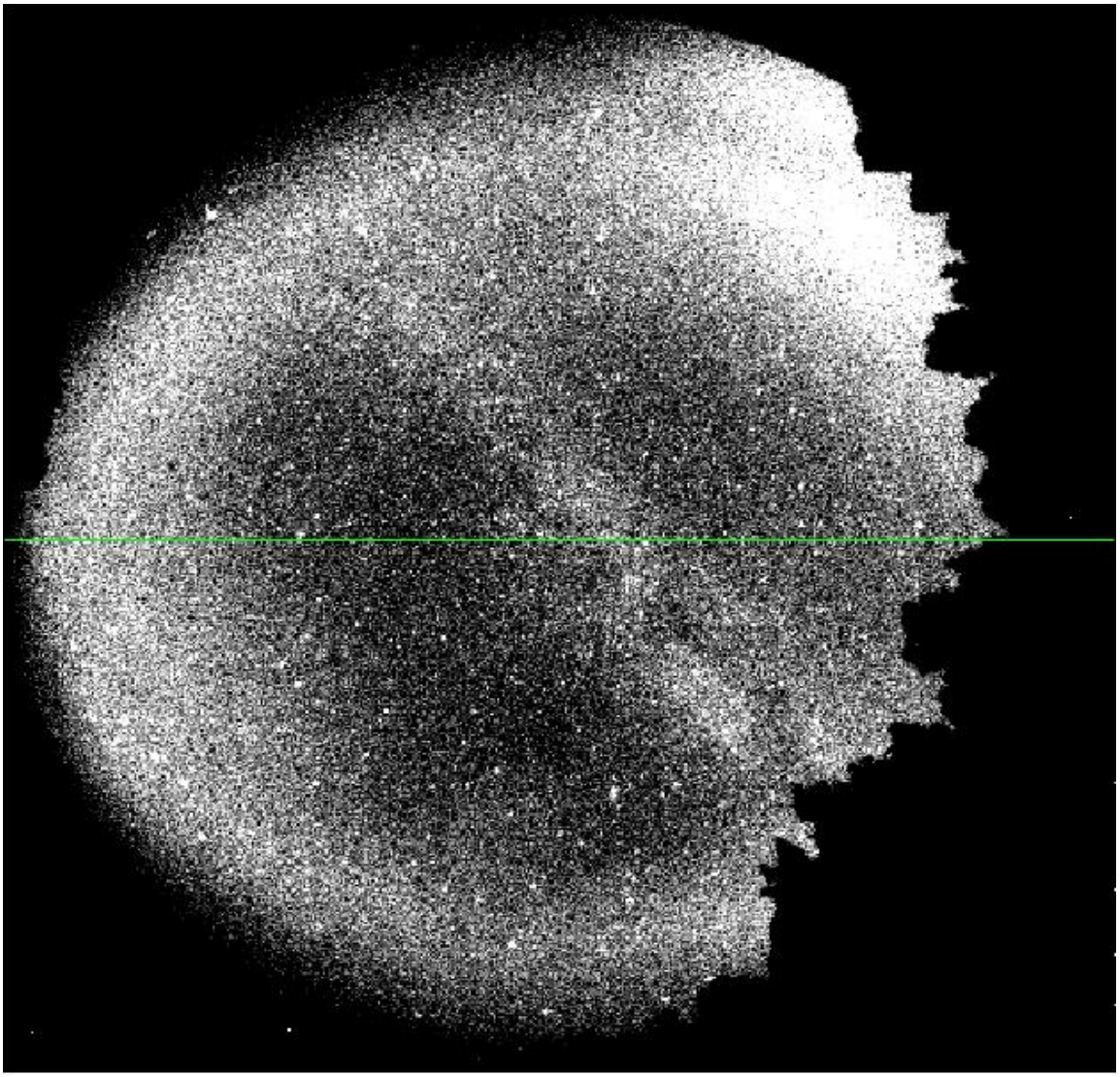


**Рис. 6.** Линия Север-Юг в Matlab нарисованные с помощью комбинации скриптов Sum_KEO и test_plot

Определить и нарисовать линию Запад-Восток более сложная задача. Для ее реализации поступил следующим образом, аналогичным построению линии Юг. Необходимо по Stellarium выбрать время и звезду, которая

пересекает азимут 270° и 90° для запада и востока соответственно. Далее аналогично нарисовал линию Запад-Восток в программе Matlab с помощью дополнения к скрипту test_plot (приложение 2) (рис. 7).

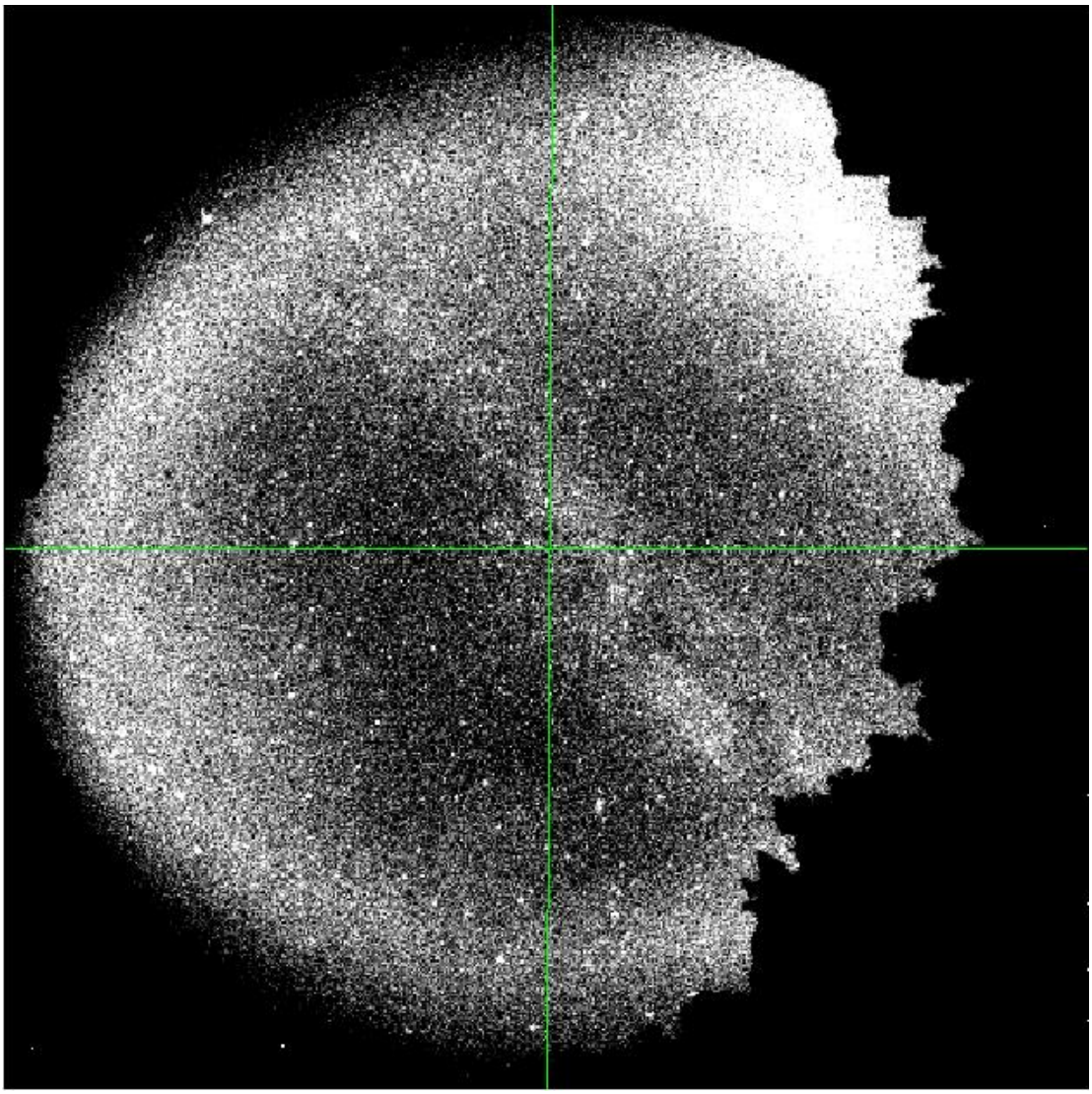


**Рис. 7.** Линии Север-Юг и Запад-Восток в Matlab нарисованные с помощью комбинации скриптов Sum_KEO и test_plot

## 2.3 Положение Зенита и построение азимутальной координатной сетки

Положение Зенита было определено по пересечению линий Север-Юг и Запад-Восток.

Для построения азимутальной координатной сетки была использована та же методика. Для того чтобы провести линии азимутальной сетки по Stellarium выбиралась звезда, которая пересекает какой-либо азимут, следовательно, после этого находим данную звезду на кадре в тоже самое время, в которое данная звезда пересекает азимут. Так как пятно возмущенной области ионосферы находится на северо-западе от точки Зенита, то наиболее точно строим азимуты именно в этом квадрате (рис.9а). А линии верхних квадратов рисуем симметрично относительно точки пересечения линий Север-Юг и Запад-Восток. Для построения высот также использовалась данная методика. Видно, что азимутальная координатная сетка, построенная в Matlab, соответствует сетке в Stellarium (рис. 9б).

С помощью построенной азимутальной координатной сетки были определены координаты и угловые размеры пятна возмущенной области ионосферы. Для того чтобы понять какие файлы выбирать для суммирования необходимо знать в какое время был нагрев, а в какое время была пауза (рис. 8)

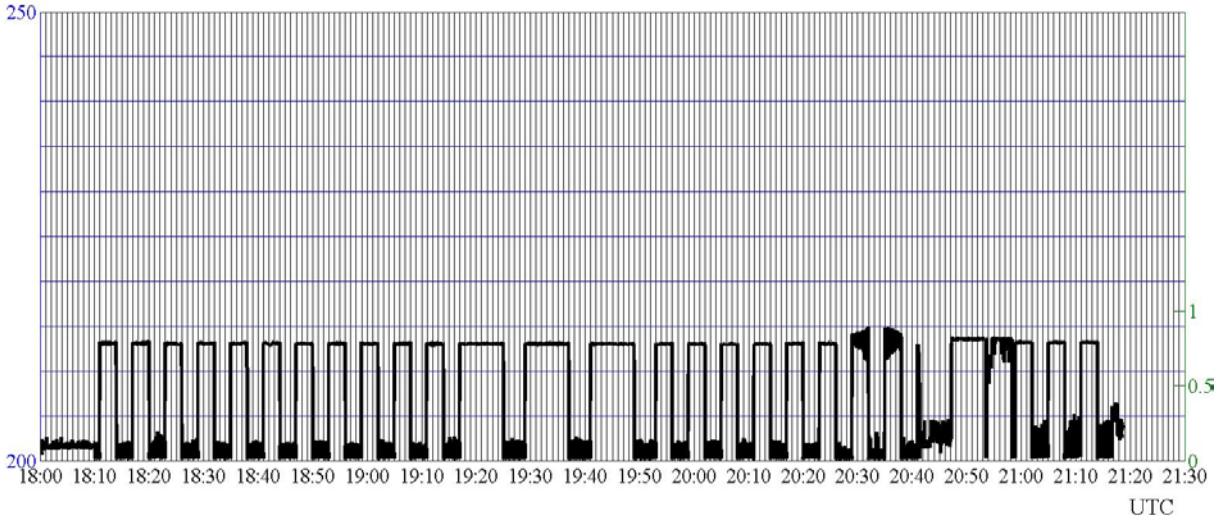
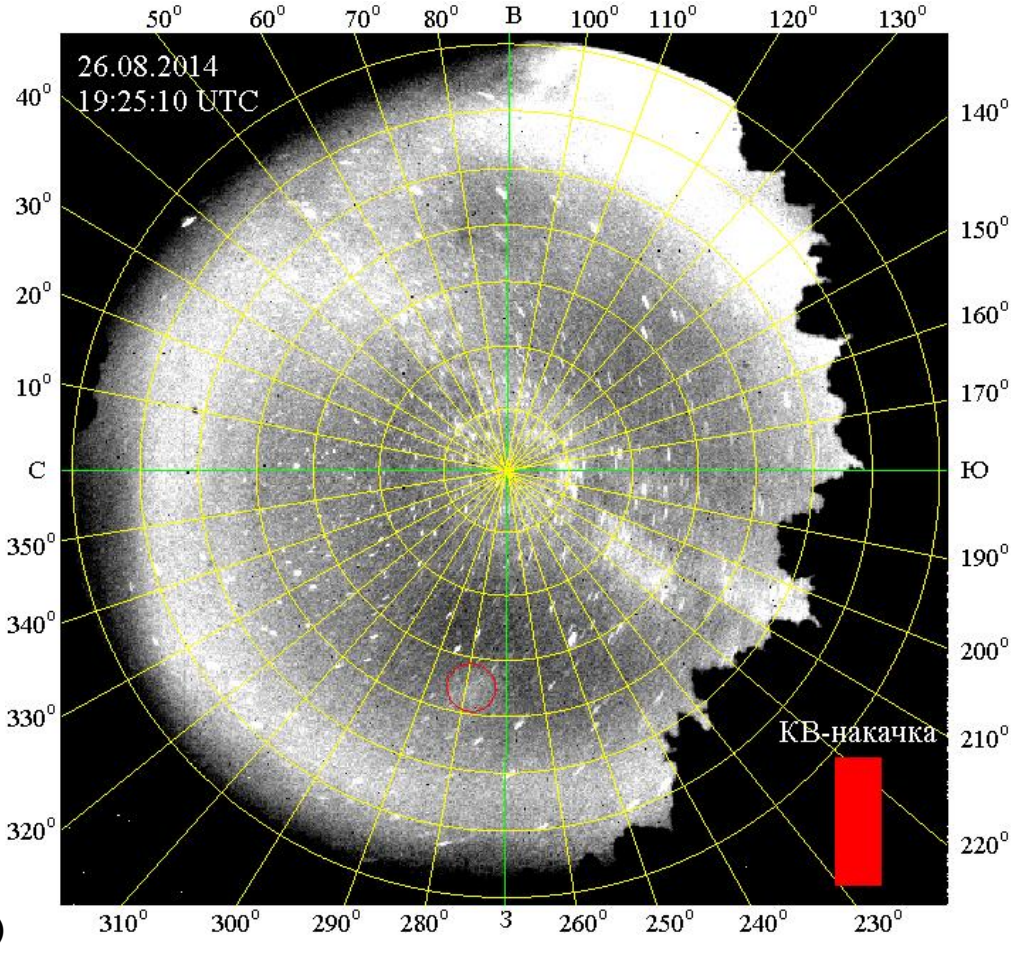
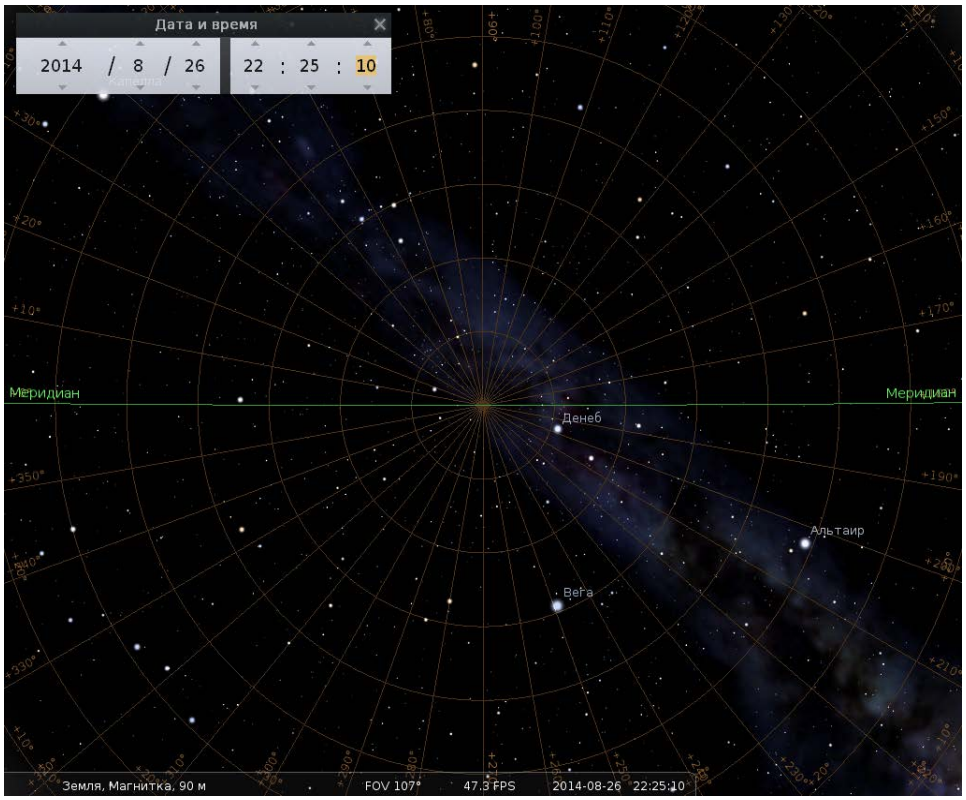



**Рис. 8.** Распределение нагрева и паузы во время эксперимента




(а)




(б)

**Рис. 9.** (а) Представлено просуммированное изображение для одного 7-ми минутного цикла накачки в формате времени UTC; (б) изображение по Stellarium

# Глава 3. Интенсивность свечения пятна возмущенной области ионосферы

.

Следующей задачей было определить среднюю интенсивность свечения пятна возмущенной области ионосферы. Для этого было необходимо определить среднюю яркость пикселей в области свечения, а так же координаты самого яркого пикселя в этом пятне. Это нужно для того чтобы понять как со временем изменяется координата самой яркой точки.

## 3.1 Координаты самой яркой точки в пятне

Для того чтобы определить координаты самой яркой точки нельзя суммировать изображения, необходимо рассмотреть каждое изображение в отдельности. Сначала необходимо узнать в какое время проводился нагрев, а в какое была пауза (рис. 8). Решить данную задачу можно следующим образом, по-прежнему воспользуемся программой Matlab и скриптом Sum_KEO (приложение 1), но на этот раз мы не суммируем несколько кадров, выбираем лишь одно изображение. Далее переводим с помощью соответствующих функций из гистограммы изображения в сам портрет ночного неба (приложение 3). Для построения на изображении азимутальной координатной сетки используем скрипт test_plot. В области, выделенным красным кругом, с помощью функции colormap можно задать диапазон яркости пикселей (рис. 10). Изменяем его до того пока в пятне не останется один яркий пиксель, проверяем по Stellarium является ли эта точка звездой, если нет, то значит данная точка является самой яркой в пятне возмущенной области ионосферы. Находим ее координаты сначала на кадре, потом получаем координаты в градусах.

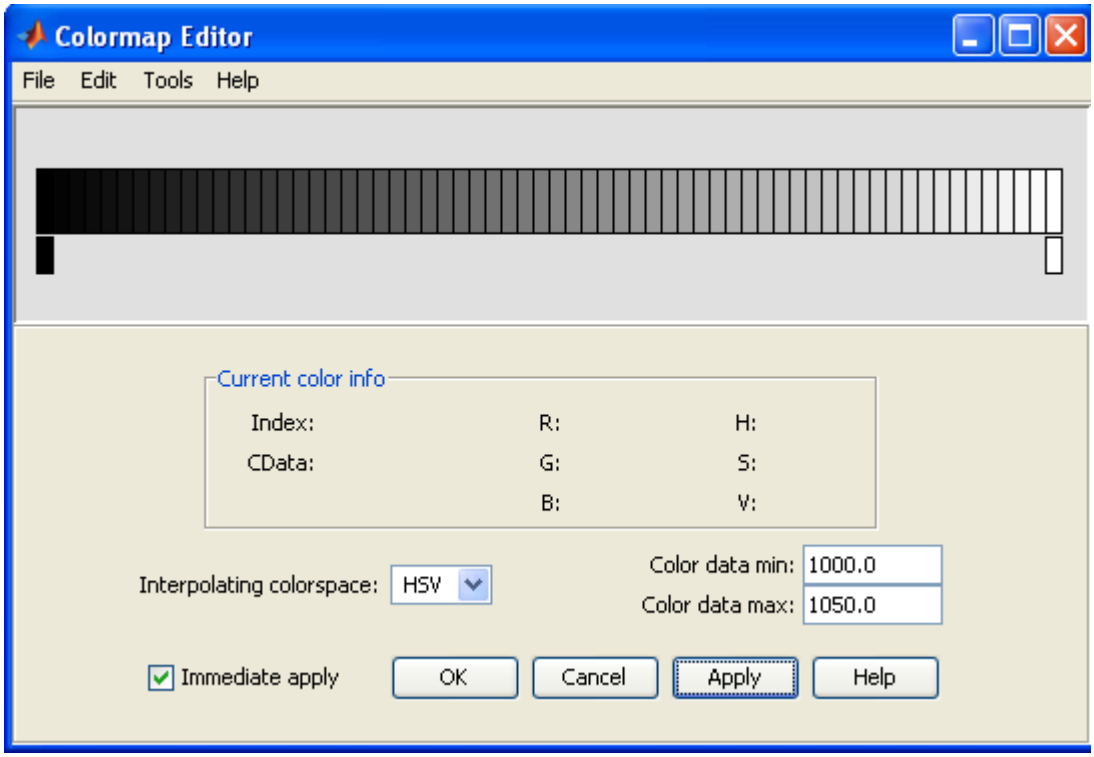



**Рис. 10.** Позволяет выбирать диапазон яркости пикселей

Были получены координаты самой яркой точки для 27 изображений в период нагрева (табл. 1).

Таблица 1.

| | ВРЕМЯ (UTC) | КООРДИНАТЫ | |
|---|---|---|---|
| | | По азимуту, в градусах | По высоте, в градусах |
| 1. | 19:17.26 | 276 | 56 |
| 2. | 19:17.57 | 275 | 54 |
| 3. | 19:18.28 | 285 | 53 |
| 4. | 19:18.59 | 277 | 55 |
| 5. | 19:19.29 | 276 | 57 |
| 6. | 19:20.00 | 276 | 56 |
| 7. | 19:20.31 | 276 | 56 |
| 8. | 19:21.02 | 278 | 53 |
| 9. | 19:21.33 | 279 | 55 |
| 10. | 19:22.04 | 276 | 56 |
| 11. | 19:22.35 | 285 | 53 |
| 12. | 19:23.06 | 275 | 55 |
| 13. | 19:23.37 | 281 | 52 |
| 14. | 19:24.08 | 281 | 52 |
| 15. | 19:24.39 | 275 | 56 |
| 16. | 19:25.10 | 277 | 55 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 17. | 19:29.18 | 280 | 52 |
| 18. | 19:29.49 | 278 | 55 |
| 19. | 19:30.20 | 279 | 55 |
| 20. | 19:30.51 | 278 | 55 |
| 21. | 19:31.22 | 279 | 52 |
| 22. | 19:59.13 | 275 | 56 |
| 23. | 19:59.44 | 279 | 52 |
| 24. | 20:00.15 | 279 | 56 |
| 25. | 20:00.46 | 276 | 56 |
| 26. | 20:01.17 | 279 | 57 |
| 27. | 20:01.48 | 276 | 56 |

## 3.2. Средняя яркость пикселей в пятне и темной области

Для того чтобы найти среднюю интенсивность свечения пятна возмущенной области ионосферы, необходимо сначала определить среднюю яркость пикселей в пятне и темной области. Делать это необходимо в два этапа:

1. найти среднюю яркость пикселей во время нагрева;
2. найти среднюю яркость пикселей во время паузы.

По-прежнему нельзя суммировать изображения, необходимо рассмотреть каждое из них в отдельности. Будем искать среднюю яркость пикселей для тех же самых портретов ночного неба, что представлены в предыдущем пункте работы (табл. 1). Используя программу Matlab и комбинацию скриптов Sum_KEO (приложение 1) и test_plot (приложение2), получаем изображения, из которых с помощью функции impixelregion можно узнать яркость каждого пикселя (рис. 11). Копируем значения всех пикселей в Excel для нахождения среднего значения, проверяя по Stellarium не проходит ли в этой области какая-либо звезда, если проходит то данный пиксель не учитываем. Выбираем по Stellarium темную область так, чтобы через нее не проходили звезды. Находим эту область на изображении, и по той же методике находим среднее значение яркости в темной области (табл. 2) (рис. 12).

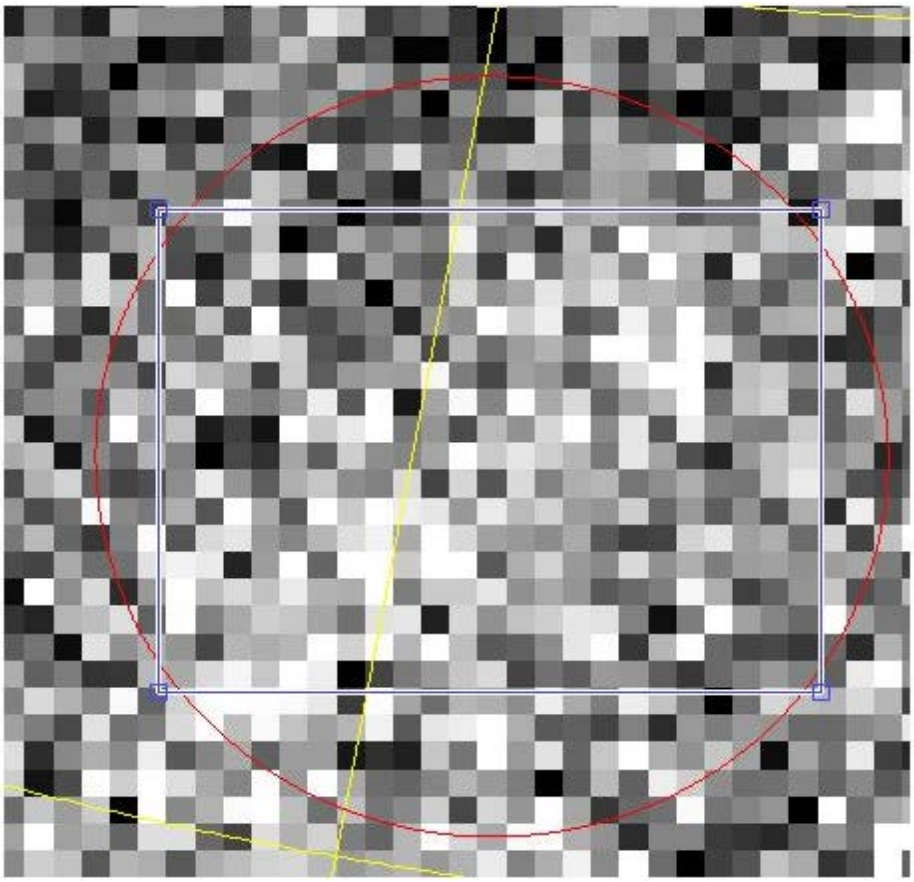


**Рис. 11.** Выполнение функции impixelregion для определения яркости всех пикселей

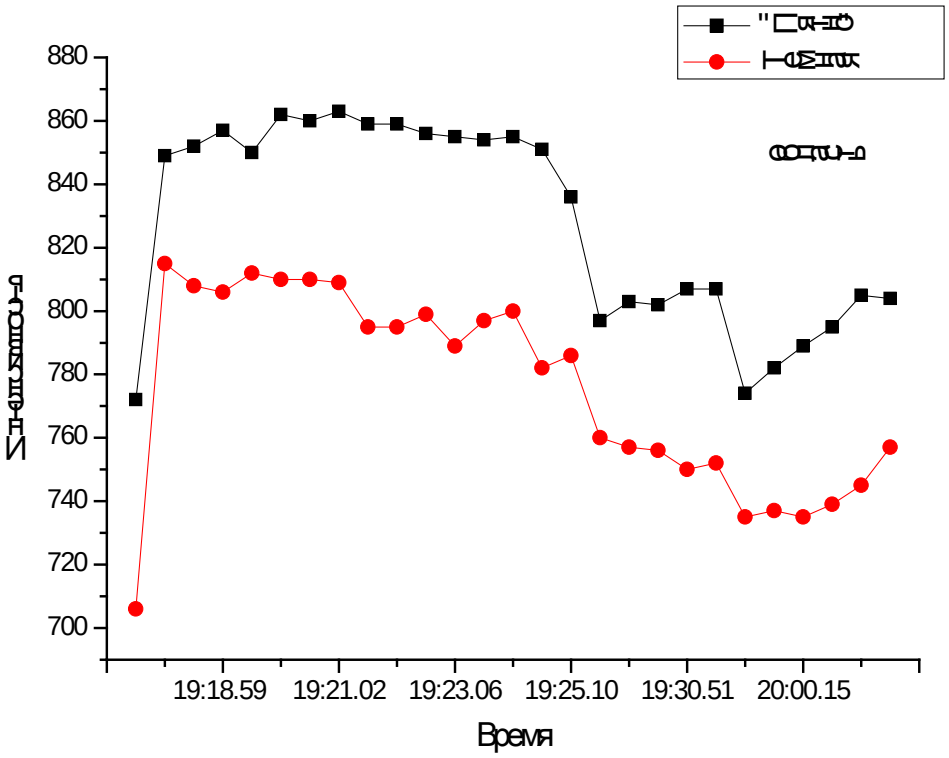



**Рис.12.** Изменение яркости пикселей со временем во время накачки

Таблица 2.

| | ВРЕМЯ (UTC) | Средняя яркость пикселей | |
|---|---|---|---|
| | | В пятне | В темной области |
| 1. | 19:17.26 | 772 | 706 |
| 2. | 19:17.57 | 849 | 815 |
| 3. | 19:18.28 | 852 | 808 |
| 4. | 19:18.59 | 857 | 806 |
| 5. | 19:19.29 | 850 | 812 |
| 6. | 19:20.00 | 862 | 810 |
| 7. | 19:20.31 | 860 | 810 |
| 8. | 19:21.02 | 863 | 809 |
| 9. | 19:21.33 | 859 | 796 |
| 10. | 19:22.04 | 859 | 795 |
| 11. | 19:22.35 | 856 | 799 |
| 12. | 19:23.06 | 855 | 789 |
| 13. | 19:23.37 | 854 | 797 |
| 14. | 19:24.08 | 855 | 800 |
| 15. | 19:24.39 | 851 | 782 |
| 16. | 19:25.10 | 836 | 786 |
| 17. | 19:29.18 | 797 | 760 |
| 18. | 19:29.49 | 803 | 757 |
| 19. | 19:30.20 | 802 | 756 |
| 20. | 19:30.51 | 807 | 750 |
| 21. | 19:31.22 | 807 | 752 |
| 22. | 19:59.13 | 774 | 735 |
| 23. | 19:59.44 | 782 | 737 |
| 24. | 20:00.15 | 789 | 735 |
| 25. | 20:00.46 | 795 | 739 |
| 26. | 20:01.17 | 805 | 745 |
| 27. | 20:01.48 | 804 | 757 |

В связи с этим найдено, что:

- среднее значение яркости в области нагрева составляет – 828;
- среднее значение яркости в темной области составляет – 776.

Следовательно, можно предположить, что интенсивность свечения это разность двух этих значений, которая составляет 52 в единицах АЦП камеры.

Но данное предположение оказывается неверным, так как всегда возможно атмосферное влияние на ту или иную область. Для этого необходимо получить яркость в области свечения не только в момент нагрева, но и в момент паузы (рис.8). Методика определения средней яркости остается прежней (табл. 3)(рис. 13).

Таблица 3.

| | ВРЕМЯ (UTC) | Средняя яркость пикселей | |
|---|---|---|---|
| | | В области свечения | В темной области |
| 1. | 19:15.53 | 830 | 815 |
| 2. | 19:16.24 | 773 | 744 |
| 3. | 19:16.55 | 610 | 590 |
| 4. | 19:25.41 | 820 | 791 |
| 5. | 19:26.12 | 812 | 795 |
| 6. | 19:26.43 | 807 | 787 |
| 7. | 19:27.14 | 793 | 786 |
| 8. | 19:27.45 | 786 | 776 |
| 9. | 19:28.16 | 779 | 774 |
| 10. | 19:28.47 | 783 | 772 |
| 11. | 19:56.38 | 773 | 731 |
| 12. | 19:57.09 | 766 | 760 |
| 13. | 19:57.40 | 763 | 731 |
| 14. | 19:58.11 | 759 | 735 |
| 15. | 19:58.42 | 756 | 737 |
| 16. | 20:02.19 | 786 | 756 |
| 17. | 20:02.50 | 783 | 761 |
| 18. | 20:03.21 | 777 | 755 |
| 19. | 20:03.52 | 774 | 756 |
| 20. | 20:04.23 | 771 | 756 |

В связи с этим найдено, что:

- среднее значение яркости в области свечения во время паузы составляет – 775;
- среднее значение яркости в темной области составляет – 755.

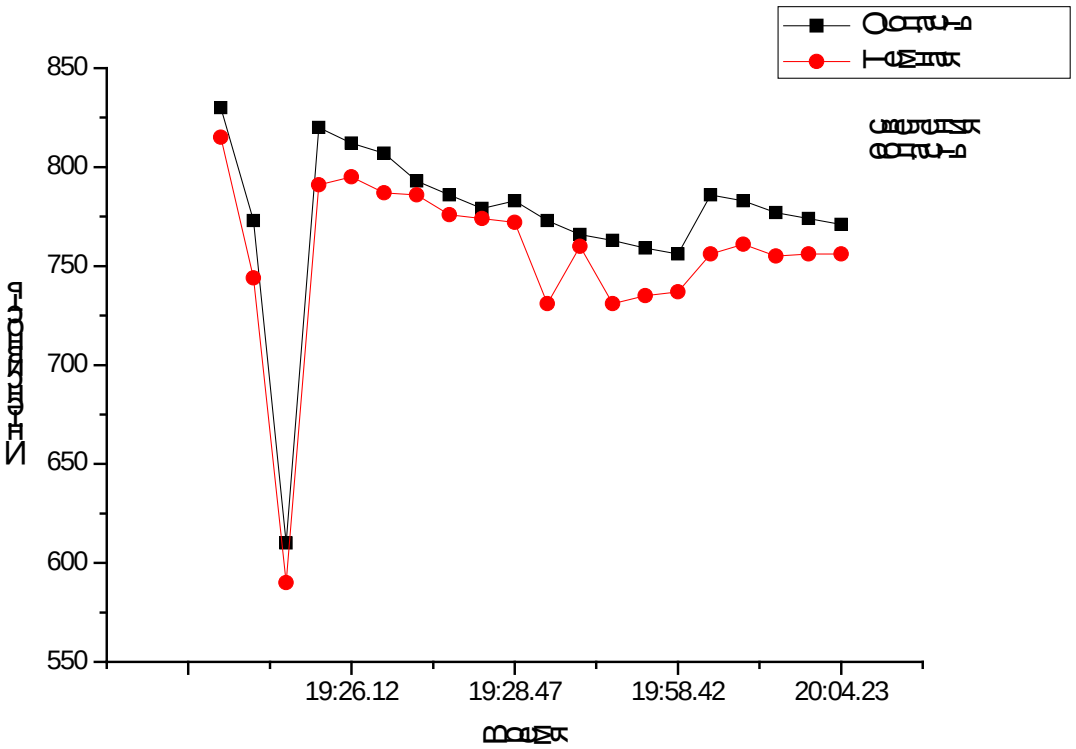



**Рис. 13.** Изменение яркости пикселей со временем во время паузы

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что разница между средними значениями во время паузы составляет 20 в единицах АЦП.

Были определены координаты самой яркой точки в области свечения во время нагрева (табл. 1). Получены средние значения яркости в пятне и темной области как во время нагрева (табл. 2) (рис.11), так и во время паузы (табл. 3)(рис. 13). Все рассматриваемые изображения были занесены в таблицу (приложение 4) (рис. 14).

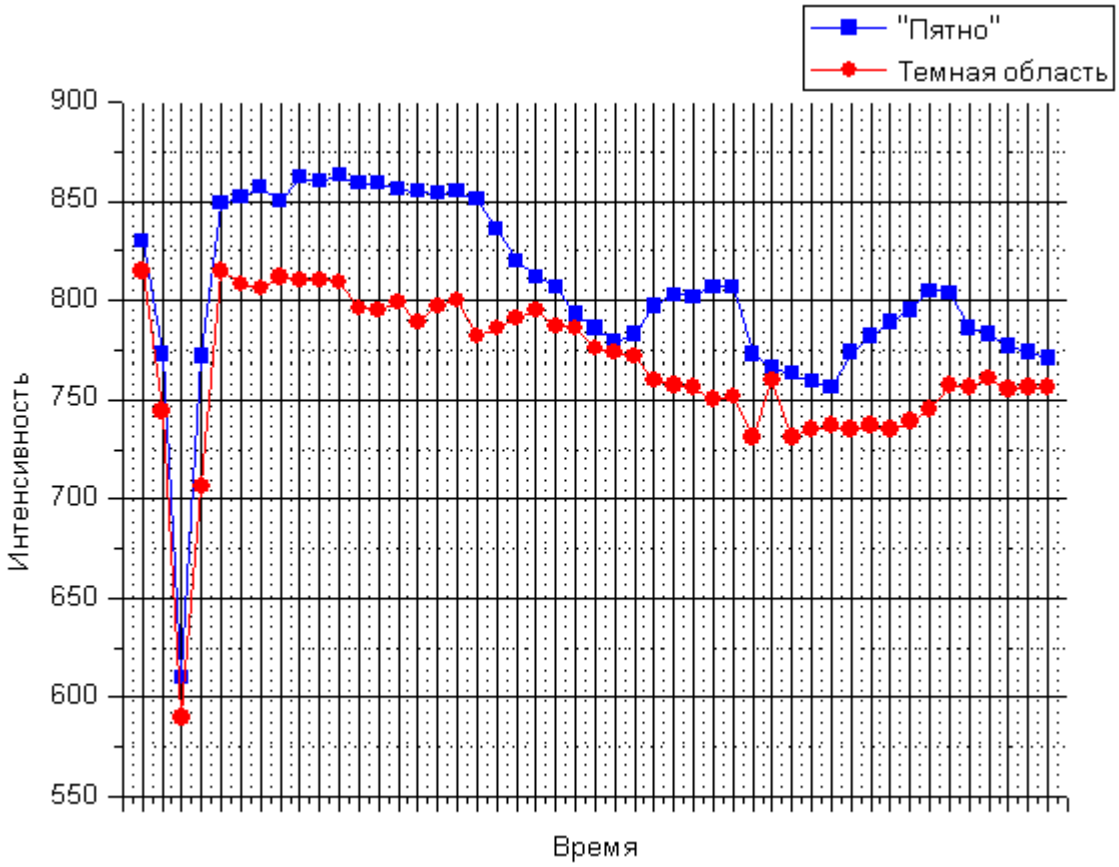



**Рис. 14.** Совместная яркость пикселей во время паузы и нагрева

# Заключение

Исходя из поставленных задач, были получены следующие результаты. В ходе выполнения работы были освоены программы Matlab и Stellariun. Были составлены скрипты Sum_KEO (приложение 1) и test_plot (приложение 2), которые позволяют построить азимутальную координатную сетку для портретов ночного неба. Благодаря полученным изображения, были определены координаты и угловые размеры пятна искусственного свечения ионосферы, стимулированного мощным радиоизлучением стенда «Сура»:

Координаты пятна:

- азимут ~ 278±2°;
- высота ~ 55±2°.

Угловые размеры пятна:

- азимут ~ 14±1°;
- высота ~ 10±1°.

Следующей целью было определить интенсивность свечения пятна возмущенной области ионосферы.

Получено, что разность средних значений в пятне и темной области во время нагрева составляет – 52 в единицах АЦП. Во время паузы – 20 в единицах АЦП.

Следовательно, можно сделать вывод, что интенсивность искусственного свечения ионосферы, стимулированного мощным радиоизлучением стенда «Сура» составляет – 32 в единицах АЦП камеры.

# Литература


1. Гуревич, А.В. Нелинейные эффекты в ионосфере // УФН. – 2007. – Т.177. № 11. – С. 145.
2. Пространственная корреляция крупномасштабных неоднородностей плотности и искусственного оптического свечения в линии /А.В. Шиндин, С.М. Грач, Е.Н. Сергеев и др. //Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2012. – № 4 (1). – С. 105–113
3. Гейтс, М. Руководство пользователя Stellarium / GNU Free Software Foundation, 2007. - 67 с.
4. Грач С.М., Клименко В.В., Шиндин А.В., Насыров И.А. и др. Оптическое свечение при воздействии на ионосферу радиоизлучением стенда "Сура» //Известия вузов. Радиофизика. – 2012. – Т. LV, № 1-2. – С. 36-56.
5. Исследование радио-и оптическими методами структуры и динамики области ионосферы, возмущенной мощным КВ радиоизлучением / Шиндин А.В – диссертация. Нижний Новгород – 2014 г.
6. Википедия. Полярная звезда / Википедия, свободная энциклопедия. – 2015г. – WikiPedia : wiki/ Полярная звезда.
7. Насыров И.А. Расчет геометрических параметров и местоположения области ионосферы, возмущенной мощным наземным радиоизлучением. 2013 г.

Приложение 1. Скрипт Sum_KEO.

```
% Sum_KEO - скрипт суммирования файлов изображений
clear all;
[filename, pathname] = uigetfile( ...
   {'*.mat','MAT-файлы'; ...
   '*.*',  'All Files (*.*)'}, ...
   'Выберите MAT-файл', ...
   'MultiSelect', 'on');
if iscell(filename) == 1
   NumberOfFiles = length(filename);
   for ii = 1:NumberOfFiles
      cmdString = ['load ',filename{ii}];
      eval(cmdString);
      frame(:,:,ii) = frm;
   end
   frame_mean = mean(frame,3);
   %frame_sum = sum(frame,3);
   frame_hist_mean = frame_mean(:);
   %frame_hist_sum = frame_sum(:);
   [n_mean,x_mean]=hist(frame_hist_mean,2^16);
   %[n_sum,x_sum]=hist(frame_hist_sum,max(frame_hist_sum));
else
   cmdString = ['load ',filename];
   eval(cmdString);
   frame_mean = frm;
   dummy = frm(:);
   [n_mean,x_mean]=hist(dummy,2^16);
end
figure;
% subplot(2,1,1)
```

```
bar(x_mean,n_mean); grid on; xlim([10 2^11]);%ylim([0 1000]);
% subplot(2,1,2)
% bar(x_sum,n_sum); grid on; xlim([10 length(n_sum)]);
% Ближайшая к зениту яркая звезда, помеченная на рисунке, проходит на
% расстоянии в 5-6 градусов от зенита.
```

Приложение 2. Скрипт test_plot

```
% Рисование картнки
 figH = figure('Position',[279,49,1087,767]);
 set(gcf,'Color','white');
 CLim = [710 960];
 imagesc(frame_mean,CLim);
 colormap(gray);
 axis square;
 axis off;
 hold on
% Местоположение полярной звезды
 PoleStar.x = 136;
 PoleStar.y = 254;
% Зенит
 Zenith.x = 257;
 Zenith.y = 257;

% Координатная сетка
 % Рисуем линию Восток-Запад
  EW.x = [259 256]; EW.y = [1 511];
  plot(EW.x,EW.y,'g','LineWidth',1)
 % Рисуем линию Север-Юг
  NS.x = [1 511]; NS.y = [257 257];
  plot(NS.x,NS.y,'g','LineWidth',1)
 % Рисуем линию 280 и 100 градусов
  A280_100.x = [211 304]; A280_100.y = [511 1];
  plot(A280_100.x,A280_100.y,'y','LineWidth',1)
 % Рисуем линию 290 и 110 градусов
  A290_110.x = [164 352]; A290_110.y = [511 1];
  plot(A290_110.x,A290_110.y,'y','LineWidth',1)
```

```
% Рисуем линию 300 и 120 градусов
 A300_120.x = [102 414]; A300_120.y = [511 1];
 plot(A300_120.x,A300_120.y,'y','LineWidth',1)
% Рисуем линию 310 и 130 градусов
 A310_130.x = [36 482]; A310_130.y = [511 1];
 plot(A310_130.x,A310_130.y,'y','LineWidth',1)
% Рисуем линию 320 и 140 градусов
 A320_140.x = [1 511]; A320_140.y = [467 50];
 plot(A320_140.x,A320_140.y,'y','LineWidth',1)
% Рисуем линию 330 и 150 градусов
 A330_150.x = [1 511]; A330_150.y = [401 116];
 plot(A330_150.x,A330_150.y,'y','LineWidth',1)
% Рисуем линию 340 и 160 градусов
 A340_160.x = [1 511]; A340_160.y = [346 171];
 plot(A340_160.x,A340_160.y,'y','LineWidth',1)
% Рисуем линию 350 и 170 градусов
 A350_170.x = [1 511]; A350_170.y = [298 216];
 plot(A350_170.x,A350_170.y,'y','LineWidth',1)
% Рисуем линию 260 и 80 градусов
 A260_80.x = [297 218]; A260_80.y = [511 1];
 plot(A260_80.x,A260_80.y,'y','LineWidth',1)
% Рисуем линию 250 и 70 градусов
 A250_70.x = [344 170]; A250_70.y = [511 1];
 plot(A250_70.x,A250_70.y,'y','LineWidth',1)
% Рисуем линию 240 и 60 градусов
 A240_60.x = [398 116]; A240_60.y = [511 1];
 plot(A240_60.x,A240_60.y,'y','LineWidth',1)
% Рисуем линию 230 и 50 градусов
 A230_50.x = [458 55]; A230_50.y = [511 1];
 plot(A230_50.x,A230_50.y,'y','LineWidth',1)
```

```
% Рисуем линию 220 и 40 градусов
 A220_40.x = [511 1]; A220_40.y = [476 38];
 plot(A220_40.x,A220_40.y,'y','LineWidth',1)
% Рисуем линию 210 и 30 градусов
 A210_30.x = [511 1]; A210_30.y = [412 102];
 plot(A210_30.x,A210_30.y,'y','LineWidth',1)
% Рисуем линию 200 и 20 градусов
 A200_20.x = [511 1]; A200_20.y = [361 154];
 plot(A200_20.x,A200_20.y,'y','LineWidth',1)
% Рисуем линию 190 и 10 градусов
 A190_10.x = [511 1]; A190_10.y = [308 206];
 plot(A190_10.x,A190_10.y,'y','LineWidth',1)

%Рисуем окружности альмуконтарат
 %Рисуем радиус угла возвышения 80 градусов
 phi = 0:0.1:360; % Угол phi = 0:2*pi [грд]
 Radius80 = 36; % Расчет через 10 грд.
  Coord80.x = 257 + Radius80*cosd(phi);
  Coord80.y = 257 + Radius80*sind(phi);
  plot(Coord80.x,Coord80.y,'y','LineWidth',0.5)
 %Рисуем радиус угла возвышения 70 градусов
 phi = 0:0.1:360; % Угол phi = 0:2*pi [грд]
 Radius70 = 73; % Расчет через 10 грд.
  Coord70.x = 257 + Radius70*cosd(phi);
  Coord70.y = 257 + Radius70*sind(phi);
  plot(Coord70.x,Coord70.y,'y','LineWidth',0.5)
 %Рисуем радиус угла возвышения 60 градусов
 phi = 0:0.1:360; % Угол phi = 0:2*pi [грд]
 Radius60 = 111; % Расчет через 10 грд.
  Coord60.x = 257 + Radius60*cosd(phi);
```

```
  Coord60.y = 257 + Radius60*sind(phi);
  plot(Coord60.x,Coord60.y,'y','LineWidth',0.5)
%Рисуем радиус угла возвышения 50 градусов
 phi = 0:0.1:360; % Угол phi = 0:2*pi [грд]
 Radius50 = 144; % Расчет через 10 грд.
  Coord50.x = 257 + Radius50*cosd(phi);
  Coord50.y = 257 + Radius50*sind(phi);
  plot(Coord50.x,Coord50.y,'y','LineWidth',0.5)
%Рисуем радиус угла возвышения 40 градусов
 phi = 0:0.1:360; % Угол phi = 0:2*pi [грд]
 Radius40 = 177; % Расчет через 10 грд.
  Coord40.x = 257 + Radius40*cosd(phi);
  Coord40.y = 257 + Radius40*sind(phi);
  plot(Coord40.x,Coord40.y,'y','LineWidth',0.5)
%Рисуем радиус угла возвышения 30 градусов
 phi = 0:0.1:360; % Угол phi = 0:2*pi [грд]
 Radius30 = 211; % Расчет через 10 грд.
  Coord30.x = 257 + Radius30*cosd(phi);
  Coord30.y = 257 + Radius30*sind(phi);
  plot(Coord30.x,Coord30.y,'y','LineWidth',0.5)
%Рисуем радиус угла возвышения 20 градусов
 phi = 0:0.1:360; % Угол phi = 0:2*pi [грд]
 Radius20 = 250; % Расчет через 10 грд.
  Coord20.x = 257 + Radius20*cosd(phi);
  Coord20.y = 257 + Radius20*sind(phi);
  plot(Coord20.x,Coord20.y,'y','LineWidth',0.5)
% Вывод на кадр даты и времени
  txtDate = [tDate(9:10),'.',tDate(6:7),'.',tDate(1:4)];
  text(10,20,txtDate,'FontName','Times New Roman','FontSize',16, ...
      'Color','white'); % Дата по российскому формату
```

```
  text(10,40,[txtTime,' UTC'],'FontName','Times New Roman', ...
     'FontSize',16,'Color','white'); % Время
% Рисуем радиус пятна
 phi = 0:0.1:360; % Угол phi = 0:2*pi [грд]
 RadiusP = 14; % Расчет через 10 грд.
  CoordP.x = 237 + RadiusP*cosd(phi);
  CoordP.y = 384 + RadiusP*sind(phi);
  plot(CoordP.x,CoordP.y,'r','LineWidth',0.5)



% Геодезическая азимутальная градуировка
 xyTick = [-18,-25,-25,-25,-25,50,110,165,210,257,295, ... % x-координаты
     340,409,472,520,520,520,520,520,520,520,520,520, ... % градуировки
     458,392,338,288,253,197,146,88,23,-30,-30,-30,-30; ... % на кадре
     257,206,152,100,36,-10,-10,-10,-10,-10,-10,-10,-10, ... %y-координаты
     -10,45,114,164,209,257,306,361,412,474,520,520,520, ... %градуировки
     520,520,520,520,520,520,466,400,345,299];            % на кадре
  xyTickLabel = {'С','10^o','20^o','30^o','40^o', ...      % Градуировка
     '50^o','60^o','70^o','80^o','В','100^o','110^o', ... % азимутальной
     '120^o','130^o','140^o','150^o','160^o','170^o', ... % координатной
     'Ю','190^o','200^o','210^o','220^o','230^o', ...     % сетки
     '240^o','250^o','260^o','З','280^o','290^o', ...     % на кадре
     '300^o','310^o','320^o','330^o','340^o','350^o'};
  for ii = 1:length(xyTick) % Вывод зачений градуировки на кадр
     text(xyTick(1,ii),xyTick(2,ii),xyTickLabel(ii), ...
        'FontName','Times New Roman','FontSize',14);
  end

%text(10,40,txtTime,'FontName','Times New Roman','FontSize',16, ...
```

```
%    'Color','white');
txtDate = [tDate(9:10),'.',tDate(6:7),'.',tDate(1:4)];
text(10,20,txtDate,'FontName','Times New Roman','FontSize',16, ...
   'Color','white');
text(415,410,'КВ-накачка','FontName','Times New Roman','FontSize',16, ...
    'Color','white');
 %plot([460 460],[500 425],'r','LineWidth',25)
 plot([460 460],[500 495],'r','LineWidth',25)
```

Приложение 3

```
CLim = [710 960];
imagesc(frame_mean,CLim);
colormap(gray);
axis square;
axis off;
hold on
```

Приложение 4

| | ВРЕМЯ (UTC) | КООРДИНАТЫ | | Средняя яркость пикселей | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | По азимуту, в градусах | По высоте, в градусах | В пятне | В темной области |
| 1. | 19:15.53 | время без накачки | | 830 | 815 |
| 2. | 19:16.24 | время без накачки | | 773 | 744 |
| 3. | 19:16.55 | время без накачки | | 610 | 590 |
| 4. | 19:17.26 | 276 | 56 | 772 | 706 |
| 5. | 19:17.57 | 275 | 54 | 849 | 815 |
| 6. | 19:18.28 | 285 | 53 | 852 | 808 |
| 7. | 19:18.59 | 277 | 55 | 857 | 806 |
| 8. | 19:19.29 | 276 | 57 | 850 | 812 |
| 9. | 19:20.00 | 276 | 56 | 862 | 810 |
| 10. | 19:20.31 | 276 | 56 | 860 | 810 |
| 11. | 19:21.02 | 278 | 53 | 863 | 809 |
| 12. | 19:21.33 | 279 | 55 | 859 | 796 |
| 13. | 19:22.04 | 276 | 56 | 859 | 795 |
| 14. | 19:22.35 | 285 | 53 | 856 | 799 |
| 15. | 19:23.06 | 275 | 55 | 855 | 789 |
| 16. | 19:23.37 | 281 | 52 | 854 | 797 |
| 17. | 19:24.08 | 281 | 52 | 855 | 800 |
| 18. | 19:24.39 | 275 | 56 | 851 | 782 |
| 19. | 19:25.10 | 277 | 55 | 836 | 786 |
| 20. | 19:25.41 | время без накачки | | 820 | 791 |
| 21. | 19:26.12 | время без накачки | | 812 | 795 |
| 22. | 19:26.43 | время без накачки | | 807 | 787 |
| 23. | 19:27.14 | время без накачки | | 793 | 786 |
| 24. | 19:27.45 | время без накачки | | 786 | 776 |
| 25. | 19:28.16 | время без накачки | | 779 | 774 |
| 26. | 19:28.47 | время без накачки | | 783 | 772 |
| 27. | 19:29.18 | 280 | 52 | 797 | 760 |
| 28. | 19:29.49 | 278 | 55 | 803 | 757 |
| 29. | 19:30.20 | 279 | 55 | 802 | 756 |
| 30. | 19:30.51 | 278 | 55 | 807 | 750 |
| 31. | 19:31.22 | 279 | 52 | 807 | 752 |
| 32. | 19:56.38 | время без накачки | | 773 | 731 |
| 33. | 19:57.09 | время без накачки | | 766 | 760 |
| 34. | 19:57.40 | время без накачки | | 763 | 731 |
| 35. | 19:58.11 | время без накачки | | 759 | 735 |
| 36. | 19:58.42 | время без накачки | | 756 | 737 |
| 37. | 19:59.13 | 275 | 56 | 774 | 735 |
| 38. | 19:59.44 | 279 | 52 | 782 | 737 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 39. | 20:00.15 | 279 | 56 | 789 | 735 |
| 40. | 20:00.46 | 276 | 56 | 795 | 739 |
| 41. | 20:01.17 | 279 | 57 | 805 | 745 |
| 42. | 20:01.48 | 276 | 56 | 804 | 757 |
| 43. | 20:02.19 | время без накачки | | 786 | 756 |
| 44. | 20:02.50 | время без накачки | | 783 | 761 |
| 45. | 20:03.21 | время без накачки | | 777 | 755 |
| 46. | 20:03.52 | время без накачки | | 774 | 756 |
| 47. | 20:04.23 | время без накачки | | 771 | 756 |