

ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ ИЗМЕРЕНИЙ АВРОРАЛЬНЫХ ЭМИССИЙ И ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЫ ИМАДЖЕРОМ «АВРОВИЗОР-ВИС/МП» НА ПЕРСПЕКТИВНОМ КА «МЕТЕОР-МП»

А.К. Кузьмин, А.М. Мерзлый

(ИКИ РАН)

М.А. Баныщикова, И.Н. Чувашов

(НИИ ПММ ТГУ)

Г.М. Крученицкий, Ю.Н. Потанин

(ФГБУ «ЦАО» Росгидромета)

П.П. Моисеев

(ООО «НПП “Астрон Электроника”»)

***Аннотация:** для измерений распределений интенсивности авроральных эмиссий с орбиты создается имаджер «Авровизор-ВИС/МП». Эти распределения несут в себе информацию об энергетических характеристиках высыпавшихся заряженных частиц, которые производят неоднородности N_e и возбуждают свечение разных масштабов на разных высотах ионосферы. Радиосигналы орбитальных систем связи и навигации на пути к Земле испытывают сцинтилляции при прохождении через эти неоднородности и структуры полярных сияний. Один из прикладных аспектов орбитальных авроральных исследований рассматривается на статистическом примере сцинтилляций сигналов GPS при пересечении авроральных дуг, изображения которых были получены на станции «Южный полюс» в [1]. Проводится обзор физических причин и характеристик сцинтилляций сигналов в полярной ионосфере. Другой рассматриваемый аспект связан с измерениями и анализом свойств мелкомасштабных структур свечения с орбиты, возбуждаемых искусственно с помощью модулированного ВЧ-излучения с Земли, он рассматривается на примере наземных фотометрических изображений, полученных в [2]. Предлагается одна из фотометрических моделей наблюдения эмиссий с орбиты в расчете на последующую реконструкцию и получение объемных изображений авроральных эмиссий и объемных распределений электронной концентрации. Так как процесс высыпаний заряженных частиц связан с магнитным полем, рассматривается одна из функций создаваемого программного обеспечения (ПО) «Вектор-М», позволяющая находить сопряжения ц. м. космического аппарата (КА) с проекцией магнитной силовой линии (м. с. л.) в получаемых изображениях, а также сопряжения всех элементов изображений измеряемых разновысотных эмиссий, что позволит уточнять восстановленные значения энергетических характеристик частиц и сравнивать эти значения с измеряемыми непосредственно в окрестности КА. Авторы видят перспективу этой методике в приложении к исследованиям влияния авроральных процессов на распространение сигналов и системе мониторинга условий в полярной ионосфере. **Ключевые слова:** полярная ионосфера, авроральный имаджер, эмиссии полярных сияний, распространение сигналов, сцинтилляции.*

Роль дистанционной оптической диагностики в процессе контроля мгновенного состояния условий в полярной ионосфере становится все более важной в связи увеличением пространственного и временного разрешения современных изображающих приборов и их пороговой чувствительности. Стимулами данной работы послужили

актуальность мониторинга характеристик ионосферы, влияющих на качество обмена сигналами бортовых и наземных радиосистем в возмущенной ионосфере и интерес к исследованиям механизмов возникновения сцинтилляций при приеме сигналов на Земле от бортовых навигационных систем, проходящих сквозь авроральные структуры в различных условиях геомагнитных возмущений.

Влияние высыпаний заряженных частиц и состояния полярной ионосферы на распространение сигналов

С самого начала развития орбитальных навигационных систем стало очевидным паразитное влияние ионосферных сцинтилляций на их работу [3], проявляющееся в ошибках определения позиции, скорости, задержках (замираниях) сигналов, а иногда даже в сбоях синхронизации и полной потери сигнала. Это влияние проявляется во всех широтах, но особенно существенно в области Эплатоновской ионосферной аномалии и в полярных зонах. Ряд обзоров, монография [4] и др. были посвящены изменениям характеристик полярной ионосферы и их влиянию на распространение сигналов в различных широтах. Краткий обзор теории сцинтилляций в возмущенной ионосфере представлен в [5].

В течение 2010–2015 гг. в Канаде и США, в скандинавских странах, в Арктике и Антарктике проводились плановые координированные наблюдения (мониторинг) и статистический анализ локаций и характеристик ионосферных сцинтилляций (мерцаний) сигналов, принимаемых наземными приемниками сети Global Navigation Satellite Systems (GNSS) от спутников Global Positioning System (GPS) (L1/L2/L2C/L5), Glonass (L1/L2), Galileo (E1/E5a/E5b/Alt-BOC) [6], одновременно с наземными фотометрическими наблюдениями свечения авроральных эмиссий, излучаемых ионизованными и нейтральными составляющими верхней атмосферы, распределения интенсивности которых откликаются на высыпания заряженных частиц на разных высотах на разных стадиях развития суббурь. В отдельных конкретных случаях эти наблюдения сопровождалось получением авроральных монохроматических изображений камерами всего неба в конкретных точках, магнитометрическими наблюдениями, риометрическими измерениями поглощения космического радиопомех, а также измерениями с орбит спутников серии Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) (измерения энергетических распределений заряженных частиц анализаторами Special Sensor Electron/Ion Spectrometer (SSJ/5) и относительно крупномасштабными (~10×10 км) измерениями интенсивности авроральных ВУФ-эмиссий подметающим изображающим спектрометром Special Sensor Ultraviolet Spectrographic Imager (SSUSI) [7]). Наблюдения проводились: в субавроральной зоне, авроральном овале, каспе и полярной шапке как порознь в северной и южной полусферах, так и одновременно в обеих полусферах [1] в различных условиях при значениях планетарного трехчасового индекса отклонений магнитного поля Kp от 1 до 5+ и индекса полярной электроструи $AE > 200$ нТ.

Параллельно с экспериментами развивались модели распространения волн сквозь ионосферные неоднородности [8–11], но из-за сложности и многообразия эффектов самые современные модели пока не позволяют формировать даже краткосрочный прогноз уровня сцинтилляций сигналов в конкретных точках пространства полярной ионосферы.

В отличие от типично гладких вариаций электронной плотности на экваторе и в средних широтах, нижняя и средняя ионосферы в высоких широтах турбулентны, им сопутствуют мелкомасштабные возмущения электронной плотности, возникающие во время суббурь [12]. Эти неоднородности приводят к богатому набору взаимодействий в плазме волна – волна и волна – частица, многие из которых еще до конца не поняты. Распределения неоднородностей Ne разных масштабов влияют на распространение

сигналов в ионосфере, являются одним из условий образования сцинтилляций сигналов, и поэтому исследования процессов образования и контроль этих распределений представляют интерес для развития бесперебойной связи. В разных работах отмечают конкретные характеристики сцинтилляций и выделяются особенности результатов координированных наблюдений, в основном они сводятся к следующим.

Причина сцинтилляций сигналов в полярной ионосфере

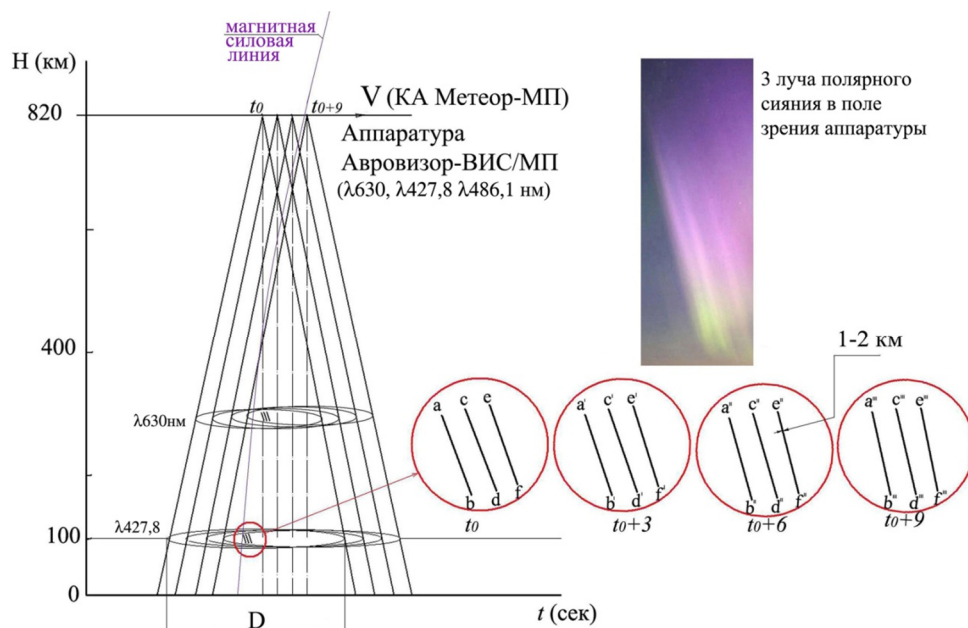
Причиной сцинтилляций сигналов в полярной ионосфере является нарушения целостности фронта волны конкретной частоты при пересечениях неоднородностей электронной концентрации δN_e , имеющих масштабы приблизительно несколько сотен метров, сравнимые с первым френелевским радиусом $r_F = \sqrt{2\lambda r}$, где λ – длина волны падающего сигнала, а r – расстояние от ионосферной неоднородности до приемника [5, 11, 13]. Эти неоднородности на пути распространения в ионосфере могут быть вытянуты (в диапазоне высот ~100–300 км) вдоль м. с. л., их образование стимулируется столкновениями нейтральных и ионизованных компонент верхней атмосферы и ионосферы с высыпавшимися (получившими в ближней магнитосфере увеличение энергии от десятков эВ до десятков кэВ) заряженными частицами, сопровождаемые образованием мелкомасштабных продольных токов, локальных градиентов электронной концентрации и поперечных проводимостей в областях авроральных структур и их ближайших окрестностей, а также их взаимодействием с волнами. Например, на КА Enhanced Polar Outflow Probe (E-POP) была зафиксирована тонкая структура продольных токов с масштабом ~1 км в диффузных пятнах полярной шапки [14, 15]. Значительные электрические поля и дрейфы плазмы в авроральной ионосфере во время суббури инициируют процессы образования плазменных неустойчивостей, которые приводят к генерации неоднородных плазменных структур, в диапазоне масштабов от метров до десятков километров в разных слоях на разных высотах полярной ионосферы [11, 16, 17]. Как следствие, возникают дисперсия в коэффициенте преломления среды, зависящем от N_e , частоты волны, эффективной частоты столкновений электронов с атомами и ионами) [18], изгибание фронта и отклонение от прямолинейного распространения и интерференция поперек волнового фронта, которые приводят к флуктуациям амплитуды и фазы сигналов (рис. 1). Скорости дрейфа (от нескольких сотен до км/с) крупномасштабных авроральных структур как в экваториальном направлении, так и в полярном – PMAF (poleward moving auroral forms), особенно в области полярного каспа в условиях, когда модули компонент межпланетного поля связаны неравенством $|B_y| > |B_z|$ [6], наблюдаемые на различных стадиях суббури, существенно влияют на мгновенные распределения неоднородностей в ионосфере, усложняют диагностику процессов, приводящих к сцинтилляциям сигналов.

Характеристики сцинтилляций

Характеристики сцинтилляций в полярной ионосфере, отражены в серии работ [1, 6, 13, 19–29].

Статистика наблюдений показывает:

- сцинтилляции трансionoсферных радиосигналов преимущественно наблюдаются на частотах от 20 МГц до 10 ГГц, причем более сильные и долгоживущие сцинтилляции, чем на L1C/A [28], наблюдаются на частотах L2C и L5;
- неоднородности с масштабами <1 км вызывают, как правило, и амплитудные и фазовые сцинтилляции, а >1 км – только фазовые;



Адаптировано из Кузьмин и др., 2015

Рис. 1. Фотометрическая модель стереосъемки (под разными азимутальными углами) распределений интенсивности двух эмиссий в одних и тех же авроральных фрагментах (лучей) с поперечными масштабами 1–2 км, попадающих последовательно в поле зрения аврорального имаджера «Авровизор-ВИС/МП» и отображаемых в серии кадров изображений, экспонируемых за 0,2–0,3 с

– во время суббури в высоких широтах доминирует фазовая сцинтилляция (~80 % событий), ~11 % – амплитудные сцинтилляции и 9 %, где наблюдались и те и другие (во время мощных геомагнитных бурь), причем более слабые сцинтилляции наблюдаются на фазах расширения и восстановления суббури, а интенсивные – во время максимальной стадии (брейккап);

– средняя длительность фазовой сцинтилляции примерно в три раза выше длительности амплитудной;

– сцинтилляции в области аврорального овала происходят чаще в ночное время Magnetic Local Time (MLT), а в области полярной шапки могут наблюдаться и в дневные часы, сцинтилляции более интенсивны вблизи магнитного зенита; фазовые сцинтилляции в авроральных пятнах и дугах в полярной шапке ассоциируются чаще с крупномасштабными неоднородностями и градиентами полного электронного содержания Total Electron Content (TEC) [26, 30, 31];

– сцинтилляции пространственно коррелируют с крутизной градиентов и амплитудой изменений локального геомагнитного поля;

– результаты наземных спектрофотометрических координированных измерений свидетельствуют, что в авроральном овале корреляция сцинтилляций с интенсивностью низковысотной кислородной эмиссии $\lambda 557,7$ нм (*E*-слой) значительно выше [21], чем корреляция с интенсивностью эмиссии $\lambda 630,0$ нм (*F*-слой), а в пятнах полярной шапки наоборот – выше корреляция сцинтилляций с красной кислородной эмиссией [6];

– сцинтилляции пространственно коррелируют в сопряженных полушариях со структурами полярных сияний (дуги), являющихся индикаторами распределений высыпаний

энергичных электронов в пределах времени жизни возбужденных уровней конкретных эмиссий, причем в одних и тех же событиях они могут наблюдаться (при пересечении сигналом одних и тех же структур) на одном приемнике и не наблюдаться на другом [22], либо наблюдаться при пересечении одной дуги или двух соседних дуг и значительно ослабевать при пересечении следующих дуг (по пути луча) в одном и том же событии.

– временная эволюция сцинтилляций в течение суббури все еще не ясна из-за недостаточности статистики образования неоднородностей Ne на разных высотах ионосферы, вызванных высокодинамичными мелкомасштабными высыпаниями электронов [13];

– влияние геометрического фактора G [11] на индекс фазовых сцинтилляций в высоких широтах, наблюдаемых приемниками сигналов GPS, незначительное [32], но требует уточнения в каждом конкретном случае.

Примеры корреляций сцинтилляций при пересечении сигналами природных авроральных структур

На рис. 2 показан пример данных коррелированных наземных оптических наблюдений и фазовых сцинтилляций в южной полусфере и одновременных наблюдений энергетических характеристик высыпающихся заряженных частиц со спутника DMSP F16 в сопряженной области северной полусферы во время суббури ($Kp=5+$) 29 апреля 2011 г, адаптированных из работы [1]. На средней панели рис. 2 приведено All-sky изображение эмиссии $\lambda 557,7$ нм, полученное на станции «Южный полюс», на нем видна авроральная структура, состоящая из трех вытянутых дуг с поперечными масштабами от 5 до 40 км, а на нижних панелях приведены в логарифмическом масштабе интегральные распределения потока энергии и средней энергии, а ниже спектрограммы дифференциального потока энергии (цвет) магнитно-сопряженных потоков высыпающихся электронов и ионов с энергиями в диапазоне 0,1–10 кэВ, которые были получены при пересечении КА DMSP F16 множества мелкомасштабных авроральных дуг в интервале времени 21:43–21:47 UT. При пересечении (протыкании) этих дуг сигналами спутников GPS Pseudo Random Number code (PRN) 1–32 наблюдались фазовые сцинтилляции. Временная развертка индекса сцинтилляций σ_{ϕ} показана на верхней панели рис. 2, при этом цвет точек соответствует сцинтилляции сигнала, приходящего от конкретного номера спутника (PRN) GPS. Изменение H -компоненты магнитного поля на станции «Южный полюс» показало развитие суббури в вышеуказанном интервале времени (верхняя панель). Проекция точек протыкания авроральных структур сигналами конкретных спутников GPS (при индексе фазовых сцинтилляций $\sigma_{\phi} > 0,15$ радиан) нанесены крупными красными точками (для South Pole (SP)) и оранжевыми точками (для IQA). На изображение цветными треугольниками нанесены положение станции SP и станций QIK и IQA, расположенными в сопряженной по м. с. л. северной полярной области. На верхней панели цветными точками показаны временные развертки: индекса фазовых сцинтилляций (цвет точек соответствует конкретным номерам PRN-спутников GPS, показанным справа от панели), H -компоненты магнитного поля, а также геометрического поглощения.

Другой пример очевидной корреляции фазовых сцинтилляций сигналов GPS с эмиссиями $\lambda 557,7$ и $\lambda 630,0$ нм в авроральных структурах на станции «Южный полюс» в условиях $Kp=3$ был детально рассмотрен в [21] и в данной работе не иллюстрируется.

Пример амплитудной сцинтилляции в северной полярной области представлен на рис. 9.17 в монографии [4], где показана «метрика» сигнала на частоте 16,8 МГц, зафиксированная 4 ноября 1993 в 05:56 UT на пути распространения сигнала между пунктами Wales и Fairbanks, а на рис. 16 показан путь распространения, наложенный на изображение аврорального овала, полученное сканирующей системой OLS в видимом диапазоне на спутнике DMSP во время мощной геомагнитной бури (National Space Weather Event 3–11 Nov. 1993), характеристики которой можно увидеть в [33]. Даже относительно низкое пространственное разрешение оперативной системы линейного сканирования Operational Linescan System (OLS) позволило «видеть» несколько крупномасштабных авроральных структур, пересекаемых сигналом.

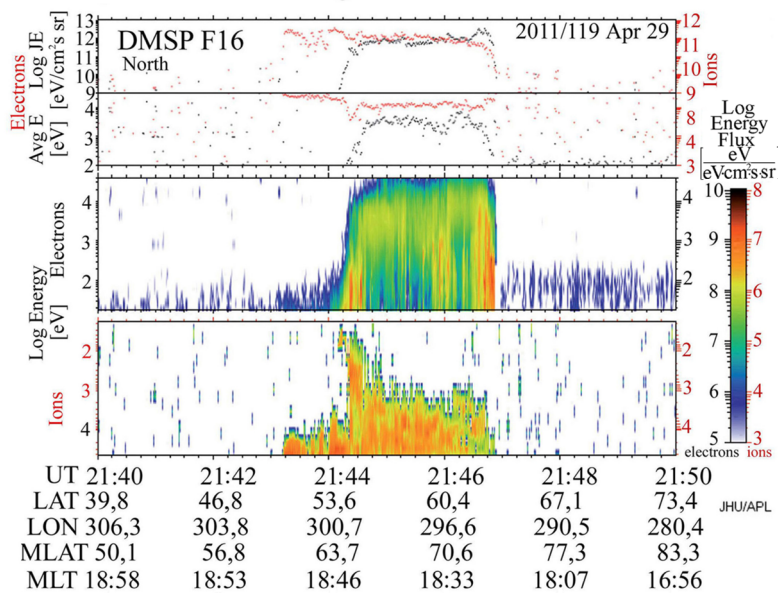
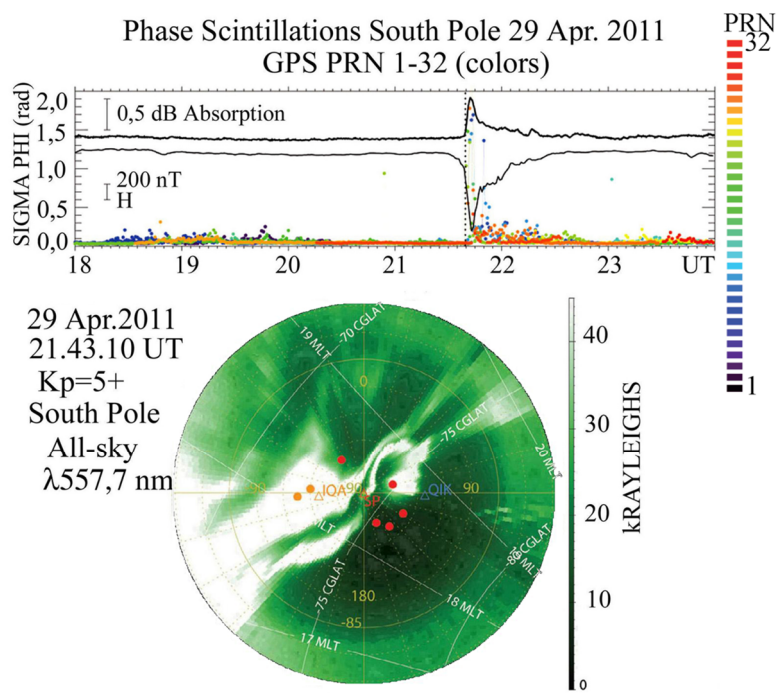


Рис. 2. На средней панели показана картографическая проекция изображения структуры авроральных форм в эмиссии $\lambda 557,7$ нм (шкала интенсивности свечения в килоРэляях показана справа от изображения) на желтой географической сетке координат (сетка скорректированных геомагнитных координат нанесена белым цветом). На нижней панели показаны спектрограммы средней энергии и потока энергии высыпавшихся электронов и протонов, полученных анализатором частиц SSJ/5 со спутника DMSP F16 в северной полярной области при пересечении вечернего сектора MLT аврорального овала в этом же интервале времени

Корреляция сцинтилляций с авроральными структурами в [1, 4, 21] очевидна в рамках масштабов измерений, но очевидно и то, что для более прецизионного анализа и дальнейших исследований взаимосвязи механизмов сцинтилляций со структурой высыпаний частиц и авроральными явлениями необходимы более мелкомасштабные орбитальные серийные измерения интенсивности эмиссий в авроральных структурах при их протыкании сигналами от спутников навигационных систем.

Причинно-следственная связь сцинтилляций с авроральными эмиссиями

Физическая причинно-следственная связь сцинтилляций радиосигналов в полярной ионосфере с оптическими эмиссиями, возбуждаемыми в полярных сияниях, является косвенной. Энергетические уровни прямо возбужденных или одновременно с процессом ионизации составляющих ионосферы и верхней атмосферы при ударе электрона, имеющего энергию более 18 эВ, имеют различные времена жизни до релаксации. Некоторые из них, как, например, эмиссии первой отрицательной системы иона молекулы азота, «высвечиваются» практически мгновенно (время жизни их возбужденных уровней несколько десятков наносекунд) и поэтому являются практически мгновенными индикаторами процессов высыпаний заряженных частиц, а интенсивность эмиссий прямо пропорциональна потоку энергии электронов. Как следствие, изображения распределений интенсивности эмиссий N_2^+ отображают мгновенные распределения градиентов электронной концентрации и потока энергии высыпавшихся электронов в максимуме E -области ночной полярной ионосферы [34], причем связь интенсивности вышеупомянутых эмиссий первой отрицательной системы N_2^+ с потоком энергии электронов (в максимуме E -области) более корректна из-за короткого времени жизни. Ряд других авроральных эмиссий и особенно интенсивные кислородные эмиссии ($\lambda 630,0$ нм и $\lambda 557,7$ нм) подходят для картографирования и диагностики средней энергии высыпавшихся электронов по их отношению к интенсивности $I(427,8) N_2^+$ [35, 36]. При этом морфологическая структура наблюдаемых эмиссий, имеющих максимумы интенсивности в E - и F -области ионосферы, может использоваться для пространственной локации и привязки позиций точек протыкания сцинтиллирующих радиосигналов к конкретным авроральным формам. Во всех рассмотренных работах, посвященных корреляционной статистике сцинтилляций навигационных сигналов с авроральными эмиссиями, решалась именно эта задача морфологической привязки, а исследования связи сцинтилляций с прямо измеренными энергетическими характеристиками высыпавшихся частиц на низкоорбитальных КА проводились ограниченно. [1], а с восстановленными (из распределений интенсивности эмиссий, наблюдаемых с поверхности Земли) картами средней энергией и потока энергии электронов, и мелкомасштабных структур Ne, за редким исключением [22], исследования не проводились.

Возбуждение эмиссий в субполярной ионосфере искусственным способом

Другой прикладной аспект наблюдений авроральных эмиссий с орбиты, на который авторы хотели бы обратить внимание, это исследования условий, при которых возникают мелкомасштабные неоднородности электронной концентрации в ионосфере и мелкие структуры свечения нейтралов и ионов, возбужденные при нагреве холодных ионосферных электронов направленным модулированным излучением от ВЧ-стендов, расположенных на поверхности Земли, и особенно в субавроральной и полярной зонах.

Искусственно возбужденное свечение ионосферы наблюдали над нагревными стендами, начиная с 70-х годов на низких и средних широтах, включая Суру, в 80-х и 90х - в субавроральных широтах на европейском стенде в Тромсе European Incoherent Scatter Scientific Association (EISCAT) и на Аляске в Гаконе (в рамках программы

Active Auroral Research Program (HAARP)) с конца прошлого века. Результаты экспериментов свидетельствовали, что структура авроральных эмиссий отображает структуру природных или искусственно созданных неоднородностей электронной концентрации в ионосфере. При использовании для регистрации наблюдений многоэлементных изображающих детекторов стало ясно, что структура неоднородностей разномасштабна с минимальными поперечными размерами до десятков метров.

Пример наземных наблюдений нетипичных (относительно наблюдавшихся ранее) структур свечения с масштабами менее 1 км рассмотрен в работе [2]. В вечернее местное время 28 октября 2008 года двумя фотометрическими имаджерами и фотометром была зафиксирована динамика развития форм свечения ряда эмиссий над зоной работы стенда, работающего циклично (2 минуты включено – 2 минуты выключено) на частоте второй гирогармоники 2,85 МГц в ординарной моде. Эксперимент проводился в условиях средних и малых геомагнитных возмущений ($Kp \leq 4,3$), когда стенд находился близко к границе плазпаузы. Рассмотрим рис. 3, адаптированный из рисунков в [2, 37]. На правой верхней панели рис. 3, условно показаны нагревный стенд, плазменные неоднородности в ионосфере, образованные под воздействием направленного ВЧ-излучения и имаджер «Авровизор-ВИС/МП» на орбите перспективного КА «Метеор-МП», ось которого направлена в нади́р.

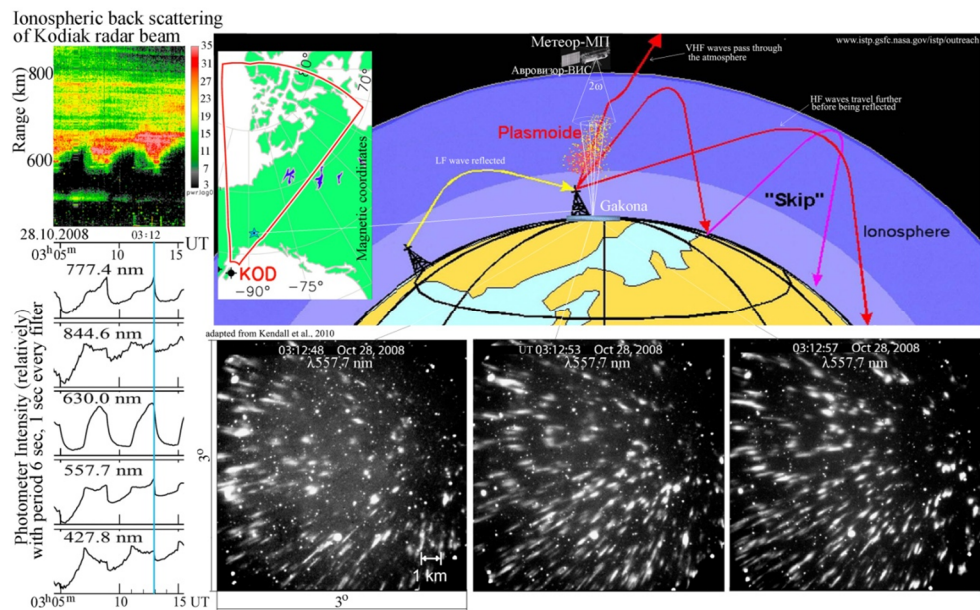


Рис. 3. На нижней панели слева направо приведены три последовательных изображения искусственно возбужденной эмиссии $\lambda 557,7$ нм, полученных с интервалом ~ 5 секунд с помощью узкоугольного ($3^\circ \times 3^\circ$) наземного телескопического имаджера, расположенного в Гаконе соосно с нагревным ВЧ-стендом HAARP во время одного из циклов нагрева (включен) ионосферы (03.11-03.13 UT). На левой нижней панели показана развертка данных интенсивности пяти эмиссий, полученных фотометром в интервале (03.05-03.15 UT), направленным соосно с имаджером. На верхней панели схематично показана геометрия нагрева ионосферы в Гаконе во время включенного ВЧ-стенда. Показаны неоднородности электронной концентрации (названные плазмоидами) отображаемые в эмиссиях верхней атмосферы и ионосферы. Показана (условно) геометрия наблюдений области свечения с орбиты перспективного КА «Метеор-МП» с помощью аврорального имаджера «Авровизор-ВИС/МП», направленного в нади́р. На карте показан сектор наблюдений загоризонтным радаром Kodiak SuperDARN, в который попадает Гакона. Левая верхняя панель показывает временную развертку (спектрограмму) обратно рассеянной мощности излучения радара во время циклов нагрева в интервале 03:05-03:15 UT

На нижней панели показаны три последовательных изображения мелких структур свечения в эмиссии $\lambda 557,7$ нм, полученные 28.10.2008 (03.12.48–03.12.57 UT) телескопическим имаджером с углом поля зрения $3^\circ \times 3^\circ$ с интервалом несколько секунд. По описанию в [2] сразу (в пределах секунд) после начала двухминутного цикла нагрева ионосферы развивались крупномасштабные диффузные структуры свечения, которые наблюдались широкоугольным имаджером с углом поля зрения $19^\circ \times 19^\circ$ (рис. 5 в [2]), а через 20–40 с на их фоне начали образовываться мелкомасштабные лучистые структуры с поперечным размером менее 1 км. Оба наземных имаджера включали матричные камеры 512×512 элементов с 16-ти битной оцифровкой интенсивности. Фотометр с углом поля зрения $14,8^\circ \times 4,2^\circ$ и диском с пятью светофильтрами работал соосно с имаджерами, измеряя интенсивность каждой эмиссии в течение 1 с в соответствующем фильтре.

Временная развертка фотометрических профилей интенсивности пяти эмиссий в относительных единицах в интервале 03:10–03:15 UT показана на левой нижней панели, причем интервал времени получения трех рассматриваемых снимков маркирован вертикальной голубой линией. Большой максимум интенсивности (в интервале 03.11–03.13 UT) на профиле эмиссии $\lambda 427,8$ нм N_2^+ , входящей в первую отрицательную систему полос 1NG, энергетический порог возбуждения которой $\sim 18,6$ эВ, свидетельствует о процессе ионизации сразу после включения нагрева в цикле в 03:11 UT. На профиле интенсивности эмиссии $\lambda 557,7$ нм наоборот – в начале цикла виден максимум интенсивности, но меньший по величине, чем перед выключением в 03:13 UT. У кислородной эмиссии $\lambda 630,0$ нм, которая высвечивается с метастабильного уровня O (1D), время жизни которого ~ 2 мин, имеется вообще только один максимум интенсивности в конце каждого цикла нагрева.

На левой верхней панели показан фрагмент диаграммы мощности обратного рассеяния пучка радара Kodiak SuperDARN от неоднородностей в нагретой области ионосферы. Вся диаграмма полностью показана на рис. 6 в [2], на которой видны несколько крупных слоев рассеяния на природных неоднородностях. Радар находится примерно в 650 км южнее точки расположения станда (см. карту поля обзора на верхней панели рис. 3). По фрагменту диаграммы также виден цикл работы ВЧ-станда (включен в 03:11 – выключен в 03:13 UT). Положение границы плазмопаузы во время нагревного эксперимента контролировалось по данным ТЕС, полученным с ряда спутников системы GPS (см. рис. 9 в [2]).

Создание имаджера «Авровизор-ВИС/МП» для измерений авроральных эмиссий с орбиты и его характеристики

Для мониторинга и исследований причинно-следственных связей природных авроральных процессов и процессов реакции ионосферы на искусственные воздействия с поверхности Земли, включая и прикладные аспекты, изложенные в п. 1 и 2, предполагается проведение координированных наблюдений эффектов сцинтилляций с прямыми измерениями энергетических распределений высыпающихся электронов и протонов, мелкомасштабных градиентов магнитного и электрического поля и дистанционных оптических измерений интенсивности трех эмиссий с помощью гелиогеофизического комплекса приборов ГАК-МП на орбите перспективного КА «Метеор-МП», а также наземными all-sky камерами, расположенными в субполярных и полярных областях. На рис. 4 в [38], адаптированного из [39], схематично иллюстрируются основные природные процессы в области взаимодействия магнитосферы с ионосферой, приводящие к ускорению и высыпанию заряженных частиц и свечению авроральных эмиссий в полярных областях, а также проекция орбиты КА «Метеор-МП». Геометрия будущих координированных авроральных наблюдений с орбиты КА «Метеор-МП» и с поверхности Земли одновременно с работой навигационных спутников показана на рис. 4. Для работы имаджера «Авровизор-ВИС/МП» намечено

использовать фотометрическую модель получения серии последовательных перекрывающихся изображений авроральных структур, проиллюстрированную условно на рис. 1 и описанную в [38, 39]. Реконструкция этих изображений на основе развития алгоритмов SIRT и MART, отлаженных при обработке наземных авроральных изображений, полученных с разных точек триангуляции [40], позволит получать объемные фрагменты изображений эмиссий и уточнять 3D-координаты локаций точек протыкания слоев ионосферы радиосигналами IonosphericPiercePoint (IPP) при приеме сигналов от конкретных спутников навигационных систем, проходящих через конкретные фрагменты аворы. В таком координированном эксперименте будут контролироваться энергетические потери высыпавшихся электронов и протонов и их вторичной электронной продукции как в подножных точках магнитной силовой линии на высотах эмиссий в *E*- и *F*-области ионосферы, так и по всей наблюдаемой «площадке», имеющей диаметр $D \sim 380$ км на высоте *E*-области; картографироваться мелкомасштабные (сотни метров) градиенты интенсивности эмиссий на разных высотах, включая: $\lambda 427,8$ (N_2^+), $\lambda 630,0$ [OI] нм и более крупномасштабные градиенты интенсивности β -линии бальмеровской серии водородной эмиссии $\lambda 486,1$ нм, прямо отражающей высыпания протонов; а также картографироваться градиенты электронной концентрации в максимуме *E*-области ионосферы [34], образующиеся при ионизации нейтралов высыпавшимися заряженными частицами.

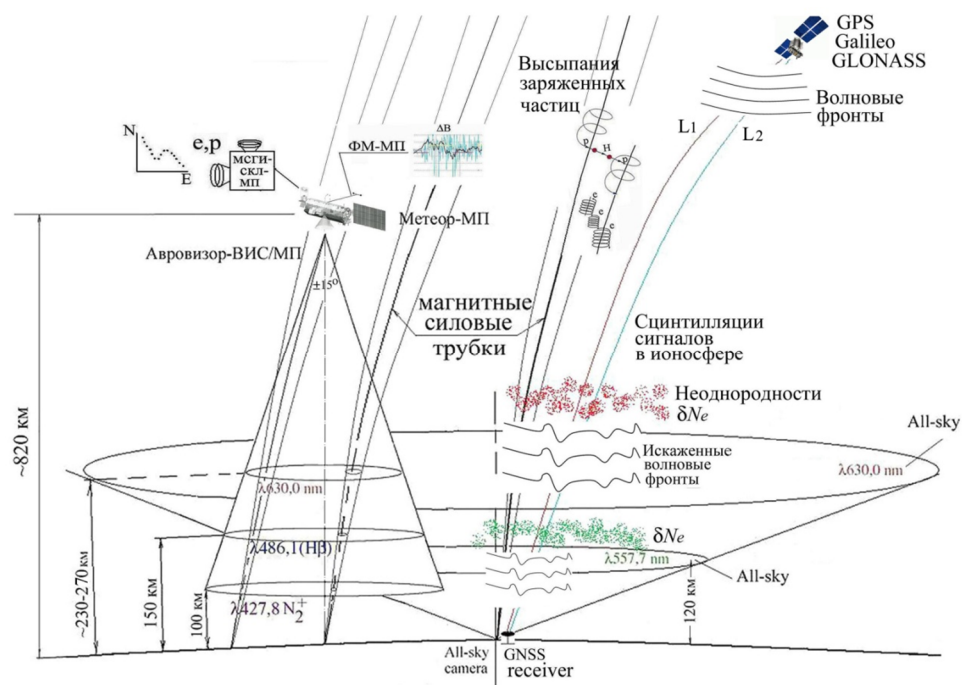


Рис. 4. Показана геометрия наблюдения свечения авроральных эмиссий с поверхности Земли на станции «Южный полюс» с помощью камеры всего неба и с орбиты КА «Метеор-МП», а также аппаратура, измеряющая спектры высыпавшихся заряженных частиц и градиенты магнитного поля на КА «Метеор-МП» (МСГИ-МП и ФМ-МП соответственно). Условно показан процесс высыпания заряженных частиц вдоль м. с. л., приводящий к образованию неоднородностей δNe в *F*- и *E*-слоях ионосферы во время возмущенных геомагнитных условий. Также условно показан процесс распространения волновых фронтов сигналов навигационных спутников и появление сцинтилляций при пересечении неоднородностей электронной концентрации и авроральных структур

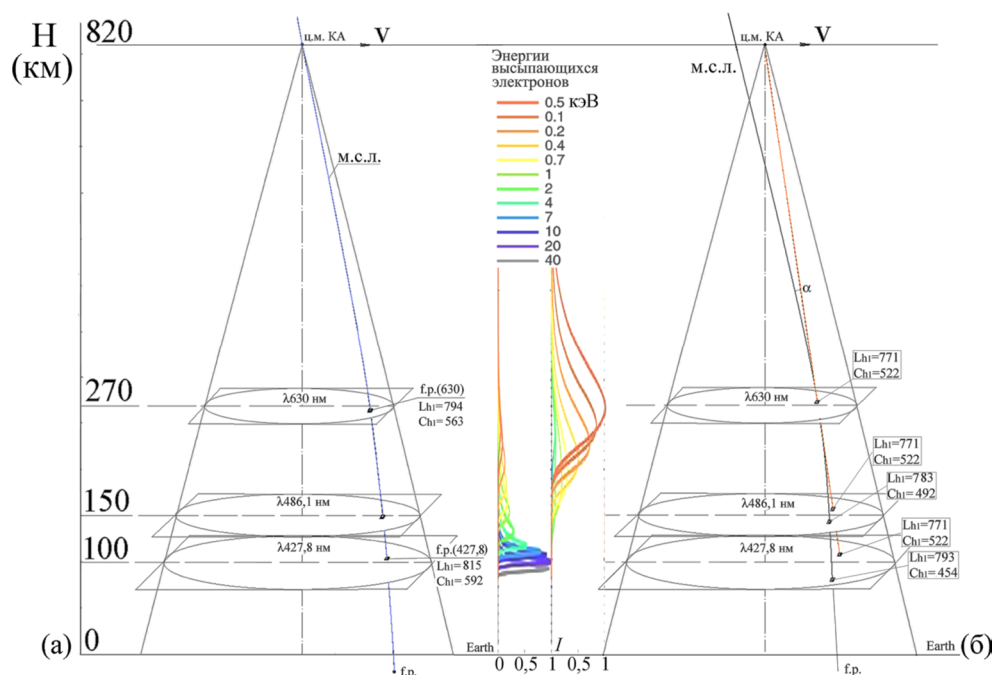


Рис. 5. Иллюстрирует одну из функций ПО «Вектор-М» [51]: *a* – трассирование вдоль м. с. л., которую КА пересекает в момент экспозиции авроральных изображений и съемки энергетических спектров частиц с помощью аппаратуры МСГИ-МП до высот максимумов интенсивности измеряемых эмиссий и вычисление положения проекции подножной (f. p.) точки м. с. л. на соответствующих изображениях; *b* – «привязка» элементов изображений авроральных эмиссий в каналах аппаратуры «Авровизор-ВИС/МП» к геомагнитной системе координат (CGM). Желтым цветом показан один из множества векторов наблюдений из точки ц. м. КА до высот максимумов интенсивности эмиссий. Трассирование от элементов изображения с высоты эмиссии λ_{630} нм ($h_3=270$ км) вдоль силовой линии магнитного поля до высоты эмиссии $\lambda_{427,8}$ нм ($h_2=100$ км) и определение соответствующих номеров элементов (номеров строк и номеров столбцов в матрице) изображения $\lambda_{427,8}$ нм. Расчет матриц сопряжений по м. с. л. всех элементов авроральных изображений на разных высотах. Далее расчет распределения средней энергии высвобождающихся электронов $E_{cp}^B = I_{630}/I_{427,8}$ (кэВ) на основе матрицы сопряжений в рамках поля изображения

В 2015 г. ИКИ РАН и ФГБУ «ЦАО» Росгидромета совместно с АО «Российские космические системы» (при участии НИИТМ ТГУ, ПГИ КНЦ РАН и ООО «НПП «Астрон электроника») выполнили дополнительный эскизный проект (ДЭП) аврорального имаджера «Авровизор-ВИС/МП» [40], входящего в состав гелиогеофизического комплекса аппаратуры (ГГАК-МП), разрабатываемый для перспективного КА «Метеор-МП». Этот КА должен быть запущен на орбиту в следующем десятилетии на стандартную солнечно-синхронную полярную орбиту с высотой ~ 820 км (рис. 1, 5). Основные характеристики аппаратуры «Авровизор-ВИС/МП» в сравнении с ее двумя зарубежными бортовыми аналогами (авроральными имаджерами видимого диапазона МАС [41] и FAI [42]) показаны в табл., адаптированной из [40]. Из табл. можно видеть несколько существенно важных характеристик российского имаджера: три параллельных канала настроены на измерения трех эмиссий $\lambda_{630,0}$ [OI], $\lambda_{427,8}$ N_2^+ и $\lambda_{486,1}$ (H_β) нм соответственно; угол поля зрения каждого изображающего канала $2\omega=30^\circ$ обеспечивает (благодаря прецизионной ориентации КА на Землю) попадание проекции магнитной силовой линии, пересекаемой КА «Метеор-МП», на высоту свечения, наблюдаемого в конкретном

канале; канал, измеряющий распределение интенсивности водородной линии, позволяет контролировать среднюю энергию высыпавшихся протонов одновременно с характеристиками высыпавшихся электронов, контролируемых в двух других каналах [39, 43]. В состав ГГАК-МП, кроме аврорального имаджера, входят тороидальные анализаторы энергетических распределений заряженных частиц (аппаратура МСГИ-МП) и феррозондовый измеритель мелкомасштабных градиентов магнитного и электрического поля ФМ-МП. В [39] показана реальность достижения пространственного разрешения $\sim 1,5$ (вдоль вектора скорости) $\times 0,5$ км (поперек вектора скорости) и временного разрешения $\sim 0,1-0,2$ с при наблюдениях эмиссий $\lambda 427,8 N_2^+$ и $\lambda 630,0 [OI]$ в авроральных структурах во время суббурь, а в водородной эмиссии (H_β) $\sim 9 \times 5$ км и $\sim 0,5-0,7$ с соответственно. Аппаратурный комплекс ГГАК-МП нацелен на мониторинг и исследования характеристик высыпавшихся заряженных частиц, локацию особенностей распределений интенсивности эмиссий в авроральных структурах, продольных токов и электрического поля в различных геомагнитных условиях.

Характеристики	Аврорвизор-ВИС/МП	FAI (Канада, запущен 29 сент 2013)	МАС (Япония, запущен 23 Авг 2005)
Угол поля зрения (град)	30	26	7,6
Угол раствора бленды (град)	31,5	27,5	?
Направление оси поля зр.	надир	надир	надир и лимб (поворотом КА)
Рабочий участок орбиты	тьнь	тьнь	тьнь
Число оптич.каналов	3	2	3
Фокусное расст. (мм)	24 (все каналы)	68,9	50 (все каналы)
Монохроматизация в каналах	1 630 нм ($\delta\lambda \sim 2$ нм, $T_{line} \sim 80\%$) 2 427,8 нм 3 486,1 нм	630 нм ($\delta\lambda \sim 2$ нм), $T_{line} \sim 0,68$ 630-1100 нм, $T \sim 0,9$	427,8 нм ($\delta\lambda \sim 2,5$ нм, $T_{max} \sim 46\%$) 557,7 нм ($\delta\lambda \sim 1,57$ нм, $T_{max} \sim 53\%$) 670 нм ($\delta\lambda \sim 38,23$ нм, $T_{max} \sim 90\%$) Interf.filters – Andover Corp.
CCD	Interf.filters – KeoScientific / Interf.filters – Andover Corp. e2V47-20 AIMO (13x13μm) 1024x1024	Interf.filters KeoScientific (630 нм) Schott RG645 (650-1100 нм) e2V67 AIMO (26x26μm) 512x512	Sony Front illuminated (6,4x6,4μm) interline transfer 1024x1024 $\sim 0,6$ (557,7 нм)
Qe CCD	$\sim 0,8$ (630 нм)	$\sim 0,8$ (630 нм); 0,66 (650-1100 нм)	0 (радиатор)
Охлаждение матрицы (°C)	до (-20) Пельтье	до (-25) Пельтье	0 (радиатор)
Бинирование пикс.	2x4 (630 нм и 427,8 нм) 8x16 (486,1 нм)	4x4 (630 нм) 2x2 (650-1100 нм)	16x16 (427,8 нм) 8x8 (670 нм)
Время эксп. (сек)	0,1-0,8 (630 нм) 0,1-0,8 (427,8 нм) 0,8-1,6 (486,1 нм)	0,5 (630 нм) 0,1 (650-1100 нм)	0,12 (мода 0, надир), 1 (мода 1, лимб)
Макс.возм.скважн.съемки	3 (в сек)	1 (630 нм); 5 (650-1100 нм);	от 0,12 до 3 (557 и 427,8 нм)
Штат.скважность съемки	1 (в 3 сек)	1 (в 1 сек 650-1100 нм)	1,1 (в 1 сек)
Число градаций по интенсивности	14/16 бит	16 бит	14 (linear)/10 (logarithmic)
Порог чувств. (Рэлей)	~ 50 (630 нм)	200 (630 нм) 100 (650-1100 нм)	$8,14 \cdot 10^3$ Рэлей/имп/мсек (427,8) $5,99 \cdot 10^3$ Рэлей/имп/мсек (557,7) $5,63 \cdot 10^3$ Рэлей/имп/мсек (670)
Чувствит.(DN/R-sec)	$\sim 0,25$ (630 нм)	0,127 (630 нм); 0,0965 (650-1100 нм)	?
Динамич. Диапазон	$\sim 10^4$ (630,0) $\sim 10^6$ (427,8) $\sim 10^3$ (486,1)	?	$0 \sim 3,21 \cdot 10^3$ (427,8) $0 \sim 2,19 \cdot 10^3$ (557,7) $0 \sim 2,1 \cdot 10^3$ (670)
Пространств.разр.мах(км)	0,4x0,4 (мах при 1024x1024)	0,4x0,4 (перигей); 2,5x2,5 (апогей)	1,2x1,2 (надир); 2,4x2,4 (лимб)
Пространств.разр. (км)	1,6x1,6 (630 и 427,8 нм) 9x9 (486,1 нм)	0,4x0,4 (перигей); 2,5x2,5 (апогей)	?
Масса прибора (кг)	15	6,72	4,59
Мощность потр.(Вт)	29 (макс.с охлажд.)	14(10)	20,4 (радиатор)
Орбита апогей-перигей(км)	820,7 (круг)	1500 x 325	670 x 610
Наклонение (град)	98,68 (солн-синхр.)	81 (не солн-синхр.)	98,6 (солн-синхр.)
Период (мин)	101,3	103	98,8

Функция ПО «Вектор-М» для пространственной привязки орбитальных авроральных изображений к магнитному полю и корреляционных расчетов сцинтилляций радиосигналов

Для корреляционных расчетов сцинтилляций сигнала в точках протыкания слоя ионосферы конкретными радиолучами конкретных навигационных КА, морфологической «привязки» по магнитному полю к конкретной авроральной структуре с помощью трассирования вдоль м. с. л. до высоты максимума интенсивности конкрет-

ной эмиссии), для расчета сопряжений изображений интенсивности разновысотных эмиссий (рис. 5), измеряемых аппаратурой «Авроризор-ВИС/МП», намечено использовать ПО «Вектор-М» [44, 45], функциональная блок-схема которого показана на рис. 6 в [38]. Учитывая, что высыпания электронов и протонов происходят вдоль м. с. л., а также свойства структур полярных сияний, рассмотренные в [46, 47], это ПО позволяет соотносить элементы изображения разновысотных эмиссий по м. с. л. (рис. 5) и тем самым обеспечить большую корректность их картографирования и окрестностей точек протыкания ионосферы сигналами, а также уточнять распределения средней энергии и потока энергии высыпающихся электронов по отношению интенсивности эмиссий и, кроме того, делать более точную привязку высыпаний к градиентам концентрации электронов N_e в максимуме E -области ионосферы и к градиентам поперечных проводимостей ионосферы Σ_p и Σ_h , интегрированных по высоте [43]. Функциональные зависимости, связывающие энергетические и электродинамические характеристики с интенсивностями измеряемых эмиссий и их отношениями, приведены в [34–36, 48–50]. На рис. 5 показаны две ситуации наблюдений эмиссий с орбиты и сопряжений по м. с. л.: a – сопряжение КА с проекциями м. с. л. на изображениях эмиссий на соответствующих высотах; b – сопряжение по м. с. л. между элементами изображений эмиссий $\lambda 630$ нм и $\lambda 427,8$ нм. ПО «Вектор-М» позволяет рассчитывать переход от матриц геометрических наблюдений эмиссий (в рамках угла поля зрения) к матрицам сопряженных элементов разновысотных эмиссий по м. с. л.

Модель съемки авроральных эмиссий с орбиты

Фотометрическую модель съемки полярных сияний аппаратурой «Авроризор-ВИС/МП» с орбиты КА «Метеор-МП» можно отнести к классу получения последовательности разноракурсных квазимонохроматических плоских стереопар изображений сцены (полярного сияния) (рис. 1) в течение интервала времени пересечения спутником неосвещенной полярной зоны, включающей субавроральную зону, авроральный овал и полярную шапку. В зависимости от конкретных геомагнитных условий этот интервал времени может составлять от 1 до 15 минут. Подразумевается, что: авроральный овал во время длительных периодов спокойных условий ($Kp=0$ в течение 10–30 суток), которые могут происходить в периоды близкие к минимуму солнечной активности, наблюдается как низкоинтенсивное диффузное свечение (~ 1 кРэлей) в относительно узкой (по геомагнитной широте) зоне высыпаний заряженных частиц, переносимых относительно небольшой поток энергии; экваториальная граница аврорального овала с высокоинтенсивным структурированным свечением (>50 кР) во время мощных геомагнитных бурь ($Kp>6$) может спускаться в средние широты (<50 °С GLAT). Положение границ модельного аврорального овала при различных геомагнитных условиях будет рассчитываться с помощью ПО «Вектор-М» с целью прогнозирования пролета КА «Метеор-МП» через полярные области на каждой орбите.

За единичный интервал наблюдений принимается период времени, за который поле наблюдения в канале 2 ($\lambda 427,8$ нм) имаджера на высоте 100 км обновляется полностью. Исходя из конусного угла поля зрения ($\pm 15^\circ$, см. табл.), геометрии наблюдений (рис. 1 и 5) при которой ось зрения направлена в надири, и линейной скорости КА ($V \sim 7,44$ км/с при круговой орбите на высоте 820 км), величина единичного интервала наблюдений получается равной ~ 52 с. В этом интервале времени серия последовательных пар перекрывающихся изображений, полученных за время экспозиции, образует стереопары, которые отражают один и тот же фрагмент авроральной структуры с разных угловых позиций (под разными зенитными и азимутальными углами). Согласно упрощенной формуле из [51], стереобазис аппроксимируется в виде:

$$B \approx 0,03 \times L, \quad (1)$$

где L (расстояние до объекта) ≈ 720 км.

Тогда для случая с геометрией наблюдений аппаратурой «Авровизор-ВИС/МП» (канал 2) на расстоянии, равном мгновенному диаметру D наблюдаемого поля (386 км на высоте 100 км), укладывается ≈ 18 стереобазисов B . Согласно требованиям стереосъемки (1), необходимая скважность съемки будет $52/18 \approx 2,89$ с, что соответствует приблизительно одному изображению в 3 с. На рис. 1 условно показана геометрия наблюдений (в каналах 1 и 2 аппаратуры «Авровизор-ВИС/МП» с высоты орбиты КА «Метеор-МП») стереопар изображений трех лучей полярного сияния со скважностью съемки 3 с. Время экспозиции каждого изображения составляет величину $\sim 0,1-0,2$ с. В рамках описания связи между координатами точек в трехмерном пространстве и их проекциями на плоскость изображения детектора изображения в камере обскура с диафрагмой конечного диаметра такая модель съемки позволит использовать последовательности наблюдаемых с орбиты плоских изображений эмиссий (или их фрагментов) для достоверных преобразований конкретных фрагментов в трехмерные структуры полярного сияния. При этом подразумевается, что смаз изображения за время экспозиции, получающийся за счет скорости КА, уже частично компенсирован с помощью переноса строк в детекторе изображения и дополнительно откорректирован с помощью математических методов. Последовательная регистрация стереопар изображений авроральных эмиссий с орбиты и их реконструкция позволит «видеть» структуру свечения полярного сияния сразу с учетом геометрической дисторсии (в рамках угла поля зрения) и локальной дисторсии, возникающей за счет изменения (в пределах нескольких градусов) угла наклона м. с. л. (к направлению в надиру), проходящей через конкретный элемент фрагмента изображения на конкретной высоте. Одновременные изображения авроральных эмиссий, полученные с орбиты (один суточный виток из 15) и с нескольких точек на поверхности Земли (например, с помощью пар изображающих камер MAIN (Multiscale Aurora Imaging Network) [52], расположенных примерно в 4-х км ($FOV \sim 18^\circ$) и в 86 км (all-sky камеры) друг от друга в окрестности г. Апатиты (ПГИ КНЦ РАН), позволят уточнять наблюдаемую структуру объемов свечения конкретных авроральных фрагментов.

Заключение

В изображениях эмиссий полярной ионосферы и верхней атмосферы заключена моментная информация о морфологической авроральной структуре и энергетических характеристиках выпадающих заряженных частиц. Эти частицы на различных стадиях суббурь создают неоднородности электронной концентрации в ионосферной плазме разных масштабов на различных высотах, которые препятствуют нормальному распространению сигналов космических систем связи и навигации. Мелкомасштабные неоднородности Ne могут быть созданы и искусственным путем при воздействии на ионосферу радиоизлучением высокой частоты. Координированные измерения сигналов в субавроральной и авроральной зонах, в полярной шапке и области каспа с наземными изображениями интенсивности эмиссий показывают статистически подтверждаемую корреляцию сцинтилляций сигналов во время протыкания радиолучами конкретных авроральных структур или серий структур. В отдельных случаях в одних и тех же событиях одновременно с корреляциями в одних конкретных структурах наблюдается ослабление фазовых корреляций при прохождении радиосигналов через другие структуры, эти факты пока не объяснены. Для исследования механизмов воздействия условий среды на распространение сигналов сквозь структуры полярных сияний, и особенно мелкомасштабные, предлагается использовать бортовой имаджер авроральных эмиссий на орбите перспективного КА «Метеор-МП», который разрабатывается для гелиогеофизического комплекса аппарату-

ры ГГАК-МП, включающего тороидальные анализаторы энергетических распределений заряженных частиц и измеритель градиентов магнитного и электрического поля. Характеристики аврорального имаджера «Авровизор-ВИС/МП» в сравнении с характеристиками зарубежных аналогов орбитальных авроральных имаджеров видимого диапазона не уступают им, а в некоторых позициях превосходят. Представленная разноракурсная фотометрическая модель наблюдений авроральных эмиссий с орбиты создаст условия для реконструкции серии последовательных плоских изображений в объемные изображения измеряемых эмиссий и объемных профилей электронной концентрации, которые позволят более корректно «привязывать» локацию сцинтилляций сигналов к высыпаниям заряженных частиц и конкретным авроральным структурам на разных высотах, распределениям энергетических характеристик заряженных частиц, восстановленным из авроральных изображений.

Список литературы

1. An interhemispheric comparison of GPS scintillation with auroral emission observed at the South Pole and from DMSP satellite / P. Prikryl, Y. Zhang, Y. Ebihara et al. // *Radio Sci.*, 2013. – V. 56. – P. 1–15.
2. Decameter structure in heater-induced airglow at the High frequency Active Auroral Research Program facility / E. Kendall, R. Marshall, R.T. Parris et al. // *Journ. Geophys. Res.*, 2010. – V. 115.
3. High frequency fading observed on the 40 Mc/s wave radiated from artificial satellite 1957a / G.S. Kent // *Journ. Atmos. Terr. Phys.*, 1959. – V. 16. – P. 10–20.
4. Hunsaker R.D., Hargreaves J.K. The high latitude ionosphere and its effects on radio propagation. Cambridge Univ., UK, 2003. – 617 p.
5. De GPS and ionospheric scintillations / P.M. Kintner, B.M. Ladvina, E.R. Paula // *Space Weather*, 2007. – V. 5.
6. Scintillation and loss of signal lock from poleward moving auroral forms in the cusp ionosphere / K. Oksavik, C. Van der Meer, D.A. Lorentzen et al. // *Journ. Geophys. Res. Space Physics*, 2015. – V. 120. – P. 9161–9175.
7. SSUSI: Horizon-to-horizon and limb-viewing spectrographic imager for remote sensing of environmental parameters / L.J. Paxton, C.-I. Meng, G.H. Fountain et al. // *Ultraviolet Technology IV*, SPIE, 1992. – V. 1764. – P. 161–176.
8. Modeling the effects of ionospheric scintillation on GPS satellite-based augmentation system availability / R.S. Conker, M.B. El-Arini, C.J. Hagarty, T. Hsiao // *Radio Sci.*, 2003. – V. 38. – № 1. – P. 1–23.
9. Ionospheric scintillation monitoring and modeling / Y. Bénéguet, V. Romano, L. et al. // *Ann. Geophys.*, 2009. – V. 52. – № 3–4. – P. 391–416.
10. Расчет основных параметров радиосигналов в канале спутник-Земля при распространении через возмущенную ионосферу / Н. Блаунштейн, С.А. Пулинец, Я. Коэн // *Геомagnetизм и аэрономия*, 2013. – Т. 53. – № 2. – С. 215–227.
11. A power law phase screen model for ionospheric scintillation 1. Weak scatter / C.L. Rino // *Radio Sci.*, 1979. – V. 14. – № 6. – P. 1135–1145.
12. Ionospheric Time-Delay Algorithms for Single-Frequency GPS Users / J. Klobuchar // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* AES-23(3), 1987. – P. 325–331.
13. Observations of GPS scintillation during an isolated substorm / K. Hosokawa, Y. Otsuka, Y. Ogawa, T. Tsugawa // *Progress in Earth and Planetary Science*, 2014. – V. 1. – P. 1–16.
14. First satellite imaging of auroral pulsating by the Fast Auroral Imager on e-POP / A. T. Y. Lui, L.L. Cogger, A. Howarth, A.W. Yau // *Geophys. Res. Lett.*, 2015. – V. 42. – P. 6877–6882.
15. A. E-POP observations of pulsating aurora / B. Fritz, M. Lessard, L. Cogger, A. Yau et al. // *Univ. New Hampshire*, 2015. – Режим доступа: Posters.unh.edu/.../POSTER-GEM-ePOP.pptx.

16. Specification and forecasting of scintillations in communication and navigation links: Current status and future plans / S. Basu, K. Grovesa, S. Basu, P. Sultana // *Journ. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 2002. – V. 64. P. 1745–1754.
17. High-latitude F-region irregularities: a review and synthesis / R.T. Tsunoda // *Rev. Geophys.*, 1988. – V. 26. – P. 719–760.
18. Колосов М.А., Арманд Н.А., Яковлев О.И. Распространение радиоволн при космической связи. – М.: Связь, 1969. – 156 с.
19. High-latitude plasma structure and scintillation / A.S. Coker, G.S. Bust, R.A. Doe, T.L. Gaussirian // *RadioSci.*, 2004. – Issue 1.
20. Characterization of high-latitude ionospheric scintillation of GPS signals / Yu Jiao., Yu. T. Morton, St. Taylor, W. Pelgrum // *Radio Science*, 2013. – V. 48. – P. 698–708.
21. GPS phase scintillation associated with optical auroral emissions: First statistical results from the geographic South Pole / J. Kinrade, C.N. Mitchell, N.D. Smith et al. // *Journ. Geophys. Res.*, 2013. – V. 118. – P. 2490–2502.
22. An auroral scintillation observation using precise, collocated GPS receivers / T.W. Garner, R.B. Harris, J.A. York et al. // *Radio Science*, 2011. – V. 46.
23. Investigation of scintillation characteristics for high latitude phenomena / S. Scone, F. Man, F. Ghafoori, R. Tiwari // *Proc. ION GNSS 2008, Session D5, Savannah, GA, 16–19 Sept. 2008.* – P. 2425–2433.
24. Statistics of GPS ionospheric scintillation and irregularities over polar regions of solar minimum / G. Li, B. Ning, Z. Ren // *GPS solute.*, 2010. – V. 14. – P. 331–341.
25. Phase scintillations at the polar ionosphere / M.J. Homam, E.M. Warrington, A.J. Stocker // *Proceeding of the IEEE International Conference on Space Science and Communication (IconSpace), 1–3 July 2013, Melaka, Malaysia.*
26. Severe and localized GNSS scintillation at the poleward edge of the nightside auroral oval during intense substorm aurora / C.van der Meerin, K. Oksavik, D.A. Lorentzen et al. // *Journ. Geophys. Res. Space Physics*, 2015. – V. 120.
27. Knight M.F. Ionospheric scintillation effects on global positioning system receivers // *Thesis of Doctor Philosophy, Adelaide, South Australia, 2000.* – 304 p.
28. Ionospheric scintillation effects on single and dual frequency GPS Positioning / S. Datta-Barua, P.H. Doherty, S.H. Delay // *Proceeding of the ION GPS 2003, Portland, OR, September 9–12? 2003.* – P. 336–346.
29. Comparison of the effect of high-latitude and equatorial ionospheric scintillation on GPS signals during the maximum of solar cycle 24 / Yu. Jiao, Yu.T. Morton // *Radio Sci.*, 2015. – V. 50. – P. 886–903.
30. Characteristics of plasma structuring in the cusp/cleft region at Svalbard / S. Basu, E.J. Weber, T.W. Bullett et al. // *Radio Sci.*, 1998. – V. 33. – P. 1885–1900.
31. Climatology of GNSS ionospheric scintillation at high latitudes / L. Spogli, L. Alfonsi, G.De Franceschi et al. // – Режим доступа: www.earth-prints.org/.../1/1745104spogli.pdf.
32. Geometrical control of scintillation indices: What happens for GPS satellites / B. Forte, S.M. Radicella // *Radio Sci.*, 2004. – V. 39. – P. 1–13.
33. An overview of the early November 1993 geomagnetic storm / D.J. Knipp, B.A. Emery, M. Engebretson et al. // *Journ. Geophys. Res.*, 1998. – V. 103. – P. 26197–26220.
34. Remote sensing of high-latitude ionization with the ISIS 2 auroral scanning photometer / R. Vondrak, J.S. Murphree, C.D. Anger // *Radio Science*, 1985. – V. 20. – № 3. – P. 439–446
35. Auroral electron energy derived from ratio of spectroscopic emissions. 1. Model computations / M.H. Rees, D. Luckey // *Journ. Geophys. Res.*, 1974. – V. 79. – № 34. – P. 5181–5186.
36. Electron auroral excitation efficient and intensity ratios / D.P. Steel, D.J. McEwen // *Journ. Geophys. Res.*, 1990. – V. 95. – P. 10321–10336.

37. Schuch N.J., Gusev A.A., Pankov V.M., Pugacheva G.I. The powerful HF transmitter as an accelerator of the ionospheric electrons. Presentation Microsoft Power point 97-2003.
38. Характеристики создаваемого орбитального имаджера «Авровизор-ВИС/МП» и перспективы использования авроральных изображений для исследований процессов в полярной ионосфере и оптического контроля неоднородности условий, влияющих на распространение сигналов / А.К. Кузьмин, М.А. Баньщикова, Ю.С. Доброленский и др. // Сб. ИКИРАН «Практические аспекты гелиогеофизики», 2016. – С. 114–133.
39. Дополнение к эскизному проекту на ГТАК-МП в части трехканального имаджера видимого диапазона «Авровизор-ВИС/МП». Пояснительная записка ЦИНВ.412125.005, 2015. – 163 с.
40. A note on the computed auroral tomography by the MART method / T. Aso, K. Murguruma, T. Yabu, T. Hashimoto et al. // Auroral Tomography Workshop Proceedings. Swedish Inst. Of Space Phys., Kiruna, Sweden, 1993. – P. 23–33.
41. Initial observations of auroras by the multi-spectral auroral camera on board the Reimei satellite / Y. Obuchi, T. Sakanoi, A. Yamazaki et al. // Earth Planets Space, 2008. – V. 60. – P. 827–835.
42. L. Cogger, A. Howarth, A. Yau et al. Fast Auroral Imager (FAI) for e-POP Mission // Space Sci. Rev., 2014. – V. 189. – P. 15–39.
43. Кузьмин А.К. Дистанционная спектрофотометрическая диагностика характеристик авроральной ионосферы с орбит зарубежных и перспективных российских КА // ИКИ РАН, 2011. – 49 с.
44. Прикладная программная система «Вектор-М» для расчета сопутствующей геофизической и астрономической информации для пространства наблюдений в эксперименте «Авровизор-ВИС/МП» на КА Метеор-МП / М.А. Баньщикова, И.Н. Чувашов, А.К. Кузьмин // Известия высших учебных заведений. Физика, 2012. – № 10/2. – С. 106–111.
45. Предварительные результаты расчета сопутствующей геофизической и астрономической информации для эксперимента с прибором «Авровизор-ВИС/МП» на перспективном КА Метеор-МП / М.А. Баньщикова, И.Н. Чувашов, А.К. Кузьмин // Известия высших учебных заведений. Физика, 2013. – № 10/2. – С. 174–180.
46. Козелов Б.В. Фрактальные характеристики пространственной структуры полярных сияний // в кн. Физика околоземного космического пространства. КНЦ ПГИ РАН, Апатиты, 2000. – С. 572–597.
47. Fractal approach to description of the auroral structure / B.V. Kozelov // Annales Geophysicae, 2003. – V. 21. – P. 2011–2023.
48. Вариации интенсивности эмиссий полярных сияний в области совместных высыпаний электронов и протонов: возможности диагностики параметров потоков частиц / Б.В. Козелов, В.Е. Иванов, Т.И. Сергиенко // Геомагн. Аэронам., 2002. – Т. 42. – № 4. – С. 513–518.
49. Remote sensing of ionosphere by using ultraviolet and visible emissions / C.-I. Meng, R.E. Huffman, R.A. Scrivanek et al. // Proceedings of SPIE, 1986. – V. 687 – Ultraviolet Technology. – P. 62–72.
50. Ratios of the I630/I427,8 and I557,7/I427,8 emission intensities in auroras / Zh.V. Dashkevich, V.L. Zverev, V.E. Ivanov // Geomagn. Aeronom., 2006. – V. 46. – № 3. – P. 366–370.
51. Image-side perspective and stereoscopy / J. Berkovitz // Proceedings of SPIE, 1998. – V. 3295. – P. 288–298.
52. MAIN (Multiscale Aurora Imaging Network) auroral cameras: overview of events observed during last winter seasons / B.V. Kozelov // Proceeding of the 10th Intl Conf. «Problems of Geocosmos». Oct. 6–10, 2014, St-Petersburg, Russia. – V. 328–333.
53. Radio wave scintillations in the ionosphere / C. Yeh, C.H. Liu // Proc. IEEE, 70, 1982. – P. 324–360.
54. Comparative auroral physics: Earth and other planets / B. Mauk, F. Bagenal // Auroral Phenomenology and Magnetospheric Processes, 2012. – V. 197 from series Geophysical Monograph, AGU, Washington, DC. – P. 3–28.