

МЕТОДИКА ДИАГНОСТИКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ АВРОРАЛЬНЫХ ЭМИССИЙ С ОРБИТ ОДНОВРЕМЕННО С ИЗМЕРЕНИЯМИ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМЫ И ЕЕ РОЛЬ В ИССЛЕДОВАНИЯХ И КОНТРОЛЕ УСЛОВИЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛОВ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ В ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЕ

А. К. Кузьмин, О. Л. Вайсберг, С. Д. Шувалов,
А. Ю. Шестаков, Г. М. Крученицкий, М. А. Баньщикова

На примерах конкретных событий рассмотрены результаты комплексных наблюдений, показывающих влияние полярной ионосферы на характеристики распространения сигналов орбитальных навигационных систем в условиях геомагнитных возмущений, и анализируется роль данных оптической диагностики в локации сцинтилляций сигналов в F- и E-областях ионосферы. В рамках подготовки перспективных российских орбитальных и наземных экспериментов, нацеленных на проведение комплексных измерений характеристик полярной ионосферы, включая получение изображений авроральных структур и их фрагментов в эмиссиях видимой области спектра, предложен вариант методики наблюдений авроральных особенностей с орбит малых космических аппаратов одновременно с характеристиками принимаемых сигналов, пересекающих эти фрагменты.

Ключевые слова: диагностика состояния полярной ионосферы, неоднородности электронной концентрации, авроральные эмиссии, фрагменты авроральных структур, авроральный овал, полярная шапка, авроральный имаджер, сцинтилляции сигналов орбитальных навигационных систем.

Введение

Результаты исследований, проводимых в последнее десятилетие, показали, что полярная ионосфера (авроральный овал, касп и полярная шапка) – это естественная околоземная лаборатория для изучения механизмов мерцаний (флуктуаций) радиосигналов на частотах навигационных систем, периодически пересекающих дрейфующие неоднородности электронной концентрации и авроральные структуры разных масштабов на разных высотах (от 100 до 400 км). Физические причины флуктуаций при приеме сигналов, прошедших через полярную ионосферу, исследуются экспериментально и моделируются уже более двух десятков лет с надеждой выработки стратегии хотя бы частичного смягчения отрицательных эффектов и последствий на качество связи в диапазоне частот от 100 МГц до 4 ГГц [1 – 4]. Временные задержки, искажения, эпизодические потери захвата частоты и флуктуации фазы и мощности сигналов на пути от навигационных спутников к приемникам, в конечном счете, приводят к потерям точности определения координат движущихся объектов на Земле, на море и в воздухе. Динамика неоднородностей N_e разных масштабов вплоть до километровых на высотах E- и F-областей полярной ионосферы в разных секторах геомагнитного местного времени Magnetic Local Time (MLT) в полярной зоне зависит от динамики солнечного ветра, от знаков компонент межпланетного магнитного поля (ММП), и, как следствие, геомагнитной и авроральной активности, и других факторов, влияющих на состояние ионосферной плазмы [5]. Турбулентности в плазме полярной

ионосферы, проявляющиеся во время геомагнитных возмущений в генерации неустойчивостей Gradient Drift Instability (GDI) и Kelvin-Helmholtz Instability (КНИ) и др. [1, 6 – 13], приводят к созданию разно-масштабных неоднородностей N_e , дрейфующих под действием электрического поля со скоростью несколько сотен м/с. Термин «сцинтилляция» относят к быстрым амплитудным и фазовым флуктуациям электромагнитных волн при приеме сигналов. Сцинтилляции сигналов происходят во время взаимодействия волн с градиентами электронной плотности в авроральных структурах и сгустках плазмы, структурированных и изменяющихся под действием высыпавшихся из магнитосферы энергичных заряженных частиц. Сопутствующие им продольные и поперечные магнитному полю электрические токи, электрические поля и, как следствие, градиенты поперечных ионосферных проводимостей участвуют в этом процессе [14]. Натываясь на неоднородности N_e , радиоволны изгибаются (дифрагируют), и, проходя сквозь них, преломляются и рассеиваются из-за множества относительно небольших градиентов в показателе преломления n , который меняется в ионосфере при изменениях дрейфующих мелко-масштабных структур электронной плотности, его величина обратно пропорциональна квадрату частоты трансмиссии f [3]. Все более существенную роль в комплексных измерениях характеристик и исследованиях физических причин этих явлений играют данные координированных экспериментов, получаемые с орбит, зондирующих ракет и поверхности Земли, включая данные измерений

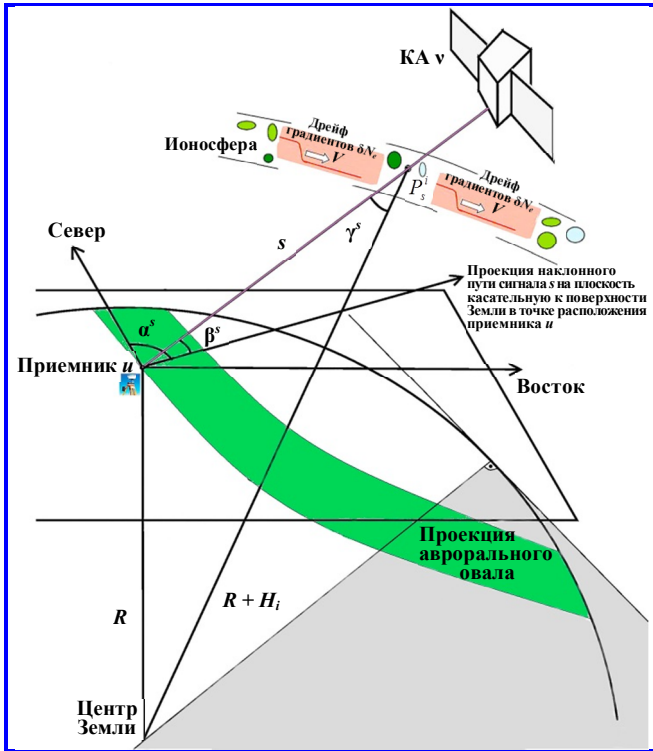


Рис. 1. Геометрия распространения в полярной зоне сигнала от навигационного космического аппарата v к приемнику u на Земле в направлении отличном от локального зенита. P_s^i – точка протыкания ионосферы IPP сигналом навигационного КА (на высоте H_i) на пути s к приёмнику u на Земле. В слое ионосферы условно показаны неоднородности (градиенты) электронной концентрации δN_e , дрейфующие под действием электрического поля со скоростью V . Зеленым цветом выделена проекция аврорального овала. Тень на Земле выделена серым цветом условно

в полосах частот приемников глобальных навигационных систем (GNSS): GPS, ГЛОНАСС, Galileo и др. [15]. Приём навигационных сигналов одновременно на нескольких частотах L1, L2, L5 и др., методы их декорреляции (т. е. утраты относительности) и алгоритмы обработки позволяют частично компенсировать задержки и улучшить точность навигации (см., например, [16]). Эффективность этих методов в полярных широтах во время геомагнитных возмущений и особенно в случаях одновременных амплитудных и фазовых сцинтилляций пока не высока. Это связано с тем, что из-за многообразности явлений фундаментальных улучшений в понимании причинно-следственных связей и деталей процессов в пространственных и временных (MLT) секторах полярной ионосферы в различных условиях, приводящих к сцинтилляциям сигналов, пока не достигнуто.

Важнейшими характеристиками при анализе состояния и моделирования ионосферы являются вы-

сотные профили электронной плотности и Total Electron Content (TEC), который определяется как линейный интеграл электронной плотности на пути конкретного луча. TEC соответствует общему количеству свободных электронов в цилиндрическом объёме с площадью поперечного сечения 1 м^2 . Единицей TEC является TECU, где 1 TECU равен 10^{16} электронов/ м^2 . Когда TEC рассчитывается в направлении отличном от локального зенита, то его принято называть Slant Total Electron Content (STEC). На рис. 1 [17] показана детальная геометрия мгновенной суперпозиции навигационного космического аппарата (КА) и приемника на поверхности Земли, используемая для расчёта STEC. Формулы для STEC и всех углов см. в [17].

Экспериментальные высотные профили N_e (см., например, высотные профили на рис. 2, (б) [18] и рис. 3, (д) [19]), полученные с помощью радаров в различных условиях на разных высотах, обеспечивают прямую информацию о неоднородностях в локальных окрестностях точек протыкания ионосферы сигналами орбитальных навигационных систем, а также позволяют уточнять модели сцинтилляций в E - и F -полярных областях в конкретное время при определенных условиях [20], но возможности радарных методов ограничены местом положения.

В контексте с анализом результатов комплексных экспериментов, включая орбитальные, ракетные и наземные, во множестве работ [4, 11 – 13, 18, 19, 21, 22] рассмотрены случаи присутствия сильных/слабых или отсутствия сцинтилляций сигналов навигационных систем в различных условиях ММП в различных секторах MLT полярной зоны. Практически во всех публикациях отмечено существенное влияние высыпающих электронов на структурирование динамических неоднородностей N_e , возникших в авроральном овале и полярной шапке, включая полярный касп. Структуры высыпаний авроральных электронов, так же как и формы аврорального свечения, разнообразны, а их масштабы от сотен-десятков км могут приближаться к масштабам гирорадиуса электрона [23]. Поэтому логично, что наряду с прямыми измерениями характеристик плазмы с орбит КА и траекторий зондирующих ракет, использование методов орбитальной и наземной оптической изображающей диагностики распределений интенсивности авроральных эмиссий имеет ряд преимуществ перед прямыми методами при условии пространственного разрешения, приближающегося к $1 \times 1 \text{ км}$. В связи с развитием детекторов характеристики изображающих приборов улучшаются, но более высокое разре-

ние пока недоступно из-за ограничений их чувствительности. Преимущества орбитальных наблюдений авроральных эмиссий перед другими методами в практически мгновенном (за $\sim 0,05 - 0,1$ с) широкоугольном охвате крупномасштабных локальных участков ионосферы (сотни км) и в отсутствии зависимости от погодных условий в тропосфере. Большинство из них были рассмотрены в [24, 25].

1. Примеры результатов комплексной диагностики условий в полярной ионосфере во время сцинтилляций навигационных сигналов и роль оптических наблюдений. Представленные примеры на рис. 2 и 3 иллюстрируют результаты, полученные в F - и E -слое ионосферы с помощью приборов частично отличающихся комплексов, установленных в Норвегии (п. 1.1.) и на Аляске (п. 1.2) при координации с измерениями характеристик сигналов навигационных КА, пересекающих авроральные структуры на пути к приёмникам GNSS в северном авроральном овале и полярной шапке во время геомагнитных возмущений.

1.1. Комплексные наблюдения на станции Skyboth в Северной Норвегии 17.03.2015. Влияние локальных увеличений электронной плотности и неоднородностей на увеличения флуктуаций TEC в полярной ионосфере и условия для генерации фазовых и амплитудных сцинтилляций GPS-сигналов во время одной из крупных геомагнитных бурь 17 марта 2015 г., вызванной воздействием на магнитосферу выброса корональной массы и высокоскоростным потоком плазмы из корональной дыры, при этом компонента B_z ММП в течение суток меняла полярность 3 раза. Все подробности условий в магнитосфере, стимулировавших развитие последовательности трёх суббурь в полярной ионосфере, см. в [18].

Пример показан на рис. 2 ((1) – (3) и (6) – (14) из [18] и (4), (5) из [4]). В [18] были рассмотрены детали развития суббури II на полярном краю сгустка (блоба) повышенной N_e , когда интенсивные фазовые и амплитудные сцинтилляции PRN13 наблюдались в слое F-2 приёмником на станции Skybotn (SKN) в Северной Норвегии (см. рис. 2, (1), (7) – (11)), и даже привели к потерям захвата частоты (GPS L2 loss of lock) приёмником PRN13 (рис. 2, (7)) на полярном краю аврорального овала в $\sim 13:32:08 - 13:32:10$ UT. При этом в E -слое сцинтилляции были слабыми. *Комментарий:* сгустки электронной концентрации в полярной шапке (внутри аврорального овала) в геофизике принято называть plasma blobs (плазменные блобы) [26]. Необходимо заметить, что по статистике амплитудные сцинтилляции в полярной ионосфере происходят значительно реже фазовых.

Внизу на рис. 2, (2) в сжатом временном масштабе (с 11 до 15 UT, 17.03.2015) показаны индексы амплитудных и фазовых сцинтилляций (S_4 и σ_ϕ) и TEC, полученные приемниками с серии спутников GPS на станции SKN. Они показаны под панелями условий космической погоды, включая скорость и динамическое давление солнечного ветра и ММП (multisatellites solar-wind database – OMNI) (2). На (3) и (4) в координатах MLAT-MLT представлены ВУФ-изображения интенсивности авроральной эмиссии LBH N2 в двух поддиапазонах LBH/ ($\lambda 1650 - 180$ нм) и LBHs ($\lambda 140 - 150$ нм) [27], полученных с пространственным разрешением $\sim 9 \times 9$ км с помощью сканирующего (поперек направления полёта) изображающего ВУФ-спектрометра SSUSI [27] с орбиты КА DMSP F17, пролетевшего через северную полярную область в интервале 13:10 – 13:34 UT (время 13:22 UT указано для момента пересечения меридиана MLT (12:00 – 00:00)). На ВУФ-изображении эмиссии LBHs на (4) нанесены локации точек протыкания (P_s^i) F -слоя ионосферы GPS-сигналами по отношению к сектору аврорального овала в интервале 13:10 – 13:34 UT, диаметр кружков вокруг этих точек отображает величину индекса фазовых сцинтилляций σ_ϕ . Самые высокие значения индекса ($\sigma_\phi > 1,5$ рад) на краю изображения в секторе 16 – 17 MLT видны в сильно усеченном виде (сегменты кружков). Красная точка на изображении LBH/ (3) показывает локацию All-sky камеры на станции SKN в околополуденном секторе аврорального овала (вблизи 13 – 15 MLT), а красные кружки вокруг нее – проекции поля зрения на углах возвышения 30 и 45°. Пятиконечными красными звёздочками на (1) в координатах MLAT-MLT показана проекция взаимного расположения точек протыкания ионосферы на высоте 350 км GPS-сигналами двух КА (PRN13 и PRN28), расположение GPS-приёмника на станции SKN, расположение Ultra High Frequency (UHF) радара European Incoherent SCATter (EISCAT) в Тромсе (розовые крестик и звездочка), а также локация UHF пучка на высоте 350 км (красный кружочек). Локации всех точек показаны на фоне карты TEC (величина которого маркирована в соответствии с цветной шкалой справа), взятой из базы данных [URL : madrigoal.sgo.fi/wt_global.html]. Карта отображает сгусток (блоб) повышенной электронной концентрации на полярном краю аврорального овала. На (5) на фоне модельного аврорального овала при $IQ = 6$ [28] цветными кружками различных диаметров показаны индексы сцинтилляций 33-х GPS-приёмников NATO Military Authorities (NMA).

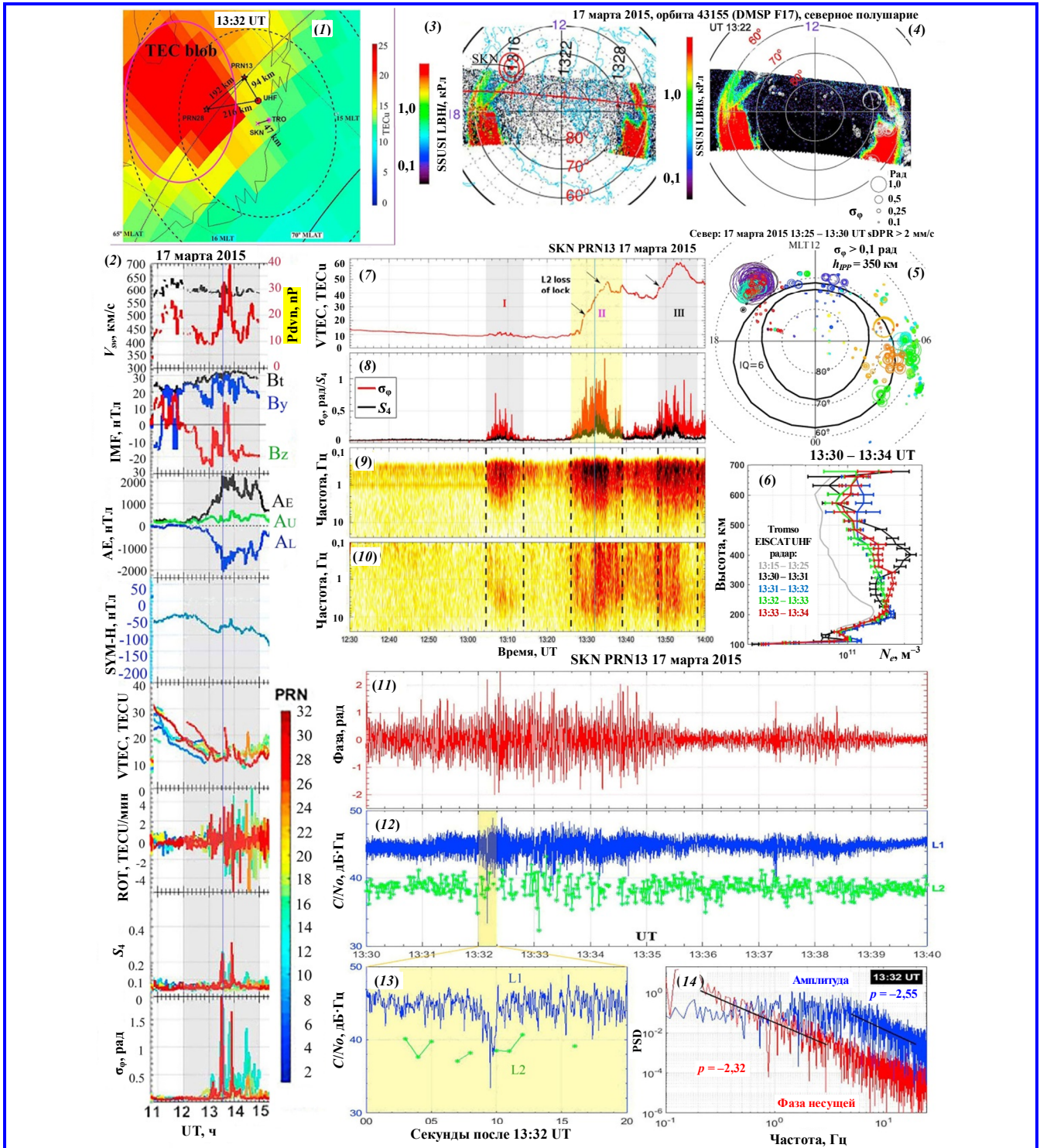


Рис. 2. Результаты комплексных наблюдений (на станции SKN в Северной Норвегии) в F -слое амплитудных и фазовых скитилляций GPS-сигналов PRN13 и PRN28 17 марта 2015 г. в интервале 13:30 – 13:40 UT во время мощной геомагнитной бури (см. текст). Авроральное изображение LBHs (4), полученное ВУФ-имаджером SSUSI с орбиты DMSP F17 одновременно с изображением LBH (3), показанном на фоне контуров географической карты, включает локации наблюдений фазовых скитилляций сигналов в точках протыкания ионосферы по отношению к сектору аврорального овала. Шкала величин индекса фазовых скитилляций σ_ϕ (в радианах) показана справа внизу от ВУФ-изображения LBHs (4) кружками различных диаметров. На фоне модельного аврорального овала (индекс $IQ = 6$ [28]) также показаны (5) локальные позиции IPP 33-х GPS-приёмников NMA 1 Гц, покрывающих Норвегию, цветными кружками различных диаметров маркированы уровни индекса фазовых скитилляций

Отдельные станции и их кодовые названия различаются по цвету (их аббревиатуры не приведены). Ionospheric Pierce Point (IPP) для GPS-приёмников International GPS Service (IGS) 1 Гц показаны синим, голубым и зеленым, Greenland GPS Network (GNET) – темно-синим и пурпурным, а массив приёмников NMA1 Гц – черным. CHAIN показаны жёлтым и оранжевым, а европейские GISTM – красным. Следует заметить, что реальная локация станции SKN на полярной границе аврорального овала в секторе ~15:00 (1) не соответствует модельной (5), где станция SKN, на которой фиксировались фазовые сцинтилляции с величиной индекса $>1,5$ рад, «располагается» на экваториальной стороне аврорального овала, что свидетельствует о грубой градации индексов IQ.

На (7) – (10) показаны для PRN13: (7) – Vertical Total Electron Content (VTEC) (в единицах TECU); (8) – развертки индексов амплитудной S_4 и фазовой σ_f сцинтилляций (выделены цветом), причем на (5) стрелками указаны два момента потери захвата частоты L2 PRN13 во время суббури II; (6) – высотные профили N_e , полученные радаром EISCAT в интервалах времени, маркированных цветом; (9) и (10) – спектрограммы фазы несущей и амплитуды принятого сигнала в Гц с устраненным трендом с использованием вэйвлета Морле [29, 30] в интервале 12:30 – 14:00 UT. На (11) – (12) в более растянутой шкале времени относительно (7) – (10) показаны самые значительные амплитудные и фазовые сцинтилляции в рассматриваемом событии суббури II, наблюдаемые в интервале 13:30 – 13:40 UT: (11) – фаза несущей с использованием фильтра Баттерворта с отрезанием частоты 0,3 Гц; (12) – отношение мощности принятого сигнала на несущей к плотности шума (C/N_0) на частотах L1 (синий) и L2 (зеленая), выраженное в дБ·Гц. На (13) – потери захвата частоты в полосе L2 длились несколько секунд (зеленый цвет), в то время как провалы мощности сигнала случались и на частоте L1 (синий цвет), а на (14) – спектр мощности (power spectral density (PSD)) фазы несущей, полученный с помощью быстрого преобразования Фурье (показан красным), который уменьшался монотонно с возрастанием частоты, тогда как PSD амплитуды (синим) оставался плоским до частоты 5 Гц и далее уменьшался с частотой.

На рис. 2 мы использовали ВУФ-изображение (4) LBHs с DMSP F17 [4], которое было получено изображающим спектрографом SSUSI в то же самое время, что и изображение LBH/ (3) [18]. Согласно [31, 32] распределение интенсивности эмиссии LBH/ функционально отображает распределение потока энергии высыпавшихся электронов, а

отношение интенсивностей LBH/LBHs = $f(E_{cp})$ является функцией средней энергии электронов [33]. Из-за грубых цветовых шкал интенсивности и отсутствия калибровочных коэффициентов нам не удалось корректно рассчитать распределения потока энергии электронов и E_{cp} по изображениям, эта попытка будет сделана повторно при дальнейшем анализе в пределах разрешения SSUSI, а также при наличии спектров высыпавшихся частиц анализатора SSJ/5, которые в работе [18] не анализировались. Высотный профиль N_e в 13:30 – 13:31 UT, полученный с помощью радара EISCAT, выделенный черным цветом на (6), свидетельствует о повышении электронной концентрации в слое F_2 .

Заметим, что эмиссия LBH (см. (3) и (4) на рис. 2), возбужденная высыпавшимися электронами в авроральном овале, имеет высоту максимума интенсивности ~150 км. И хотя эта высота ниже слоя F_2 , где наблюдались сцинтилляции, тем не менее изображение LBHs ((4) на рис. 2) в рамках своего грубого пространственного разрешения отображает пространственную корреляцию более интенсивных сцинтилляций сигнала PRN13 со структурами в авроральном овале во время суббури II, и более слабых – со структурами в полярной шапке. Так как чувствительность спектрометра SSUSI и его пространственное разрешение не высоки, то более подробные детали этой корреляции со структурой высыпаний электронов в эмиссии не отображаются, а данные радара EISCAT (см. высотный профиль N_e в 13:30 – 13:31 UT (черный цвет) на панели (6) свидетельствуют о существенном увеличении N_e на высоте слоя F_2 в этот минутный период. Поэтому мотивация использования в перспективных проектах высокочувствительных авроральных имаджеров с километровым пространственным разрешением очевидна (см. далее), тем более, когда одновременно могут наблюдаться эмиссии в E - и F -слое ионосферы.

1.2. *Комплексные наблюдения на Аляске 21.12.2015.* Вторым пример рассмотрим на основе данных комплексного эксперимента в работе [19], полученных в условиях умеренной магнитной бури 20 – 21 декабря 2015 года. Он характерен тем, что в отличие от примера в п. 1.1, фазовые сцинтилляции наблюдались в E -слое ионосферы, а амплитудных сцинтилляций не наблюдалось. Причём наиболее интенсивные фазовые сцинтилляции происходили 21 декабря, когда знаки B_z и B_y изменили знак и стали <0 , и в этих условиях аврора над Аляской была наиболее структурирована, хотя во время главной фазы 20 декабря ярко выраженных структур не наблюдалось.

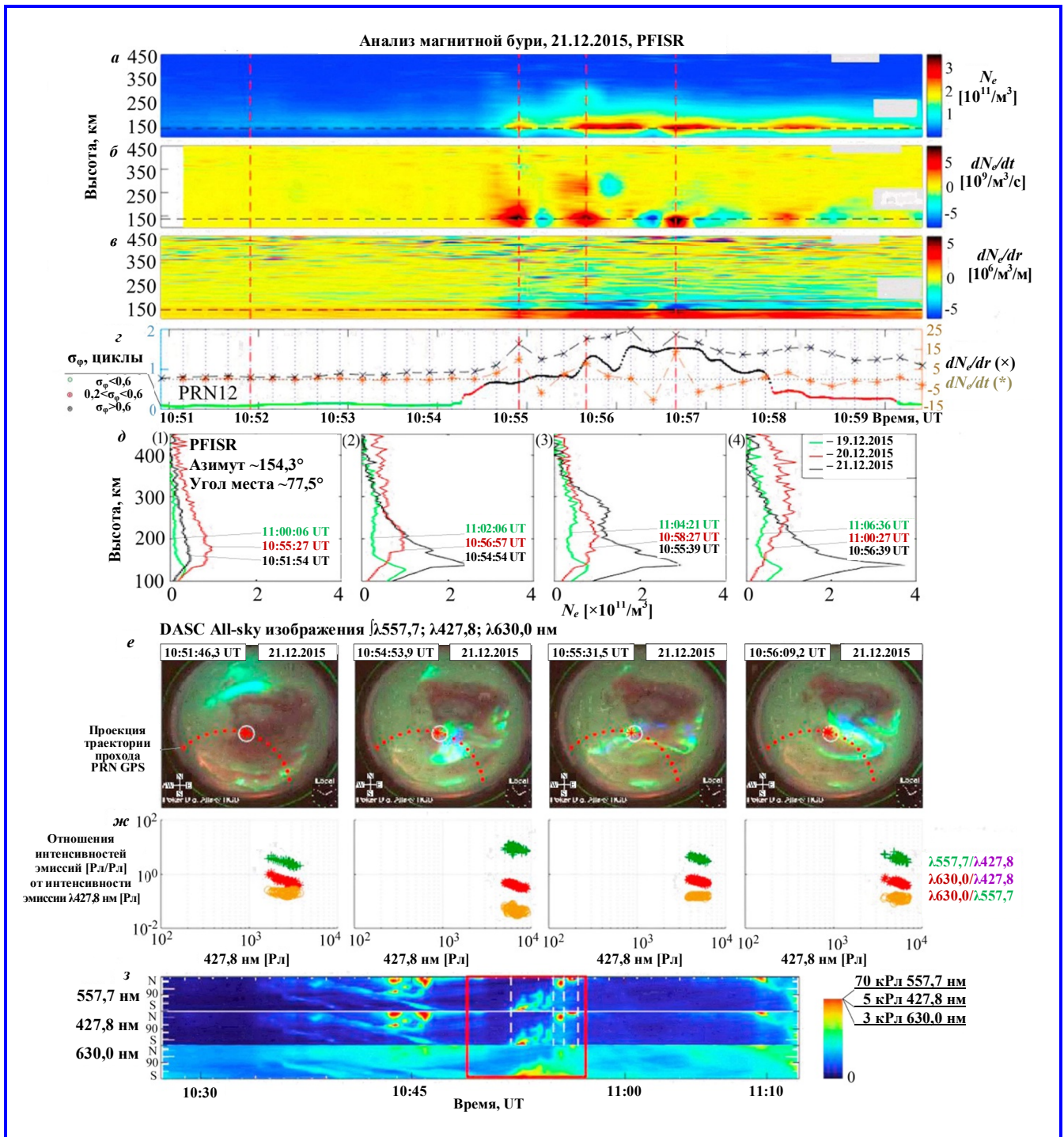


Рис. 3. Результаты комплексных наблюдений на Аляске 21.12.2015 фазовых сцинтилляций GPS-сигнала (г) при пересечении неоднородностей N_e на высотах E-слоя, наблюдавшихся радаром PFISR. Временные развертки высотных профилей N_e , dN_e/dt и dN_e/dr (а, б, в); высотные профили N_e (PFISR) 19, 20 и 21 декабря 2015 г., маркированные цветом (д); четыре авроральных All-sky изображения (интегрированы из трёх эмиссий) распределений интенсивности в авроральных структурах, наблюдавшихся во время высываний электронов в конце магнитной бури 21.12.2015 в интервале 10:51:46 – 10:56:09 UT (е); четыре, соответствующих изображения на (е), зависимости отношений интенсивностей эмиссий $I_{557,7}/I_{427,8}$; $I_{630,0}/I_{427,8}$ и $I_{630,0}/I_{557,7}$ от интенсивности $I_{427,8}$ (ж), и кеограмма (Север – Юг) распределений интенсивности всех трёх эмиссий с 10:30 по 11:10 UT (з) со шкалой интенсивности (в килоРэлях)

В этом комплексном эксперименте на Аляске были задействованы Poker Flat Incoherent Radar near Fairbanks (PFISR), а также сеть DASC монохроматических цифровых All-sky камер (они построены с использованием детекторов изображений Electron multiplying charge coupled device (EMCCD)), созданная для проекта THEMIS [34] и настроенная на измерения распределений интенсивностей авроральных эмиссий 427,8 N_2^+ , 557,7 [OI] и 630,0 [OI] нм. При панорамном угле поля зрения $\sim 170^\circ$ диаметр наблюдаемой области на высоте 110 км составлял ~ 1000 км. Съёмка на каждой длине волны проводилась циклами каждые 12 с с временем экспозиции $\sim 1 - 3$ с. На рис. 3 показаны данные радарных и оптических наблюдений 21 декабря 2015 г. в интервале 10:50:47 – 10:59:32 UT [19]. Пределы цветовых шкал интенсивностей эмиссий на кеограмме (з) показаны для всех измеряемых эмиссий: 70 кРл ($\lambda 557,7$ нм), 5 кРл ($\lambda 427,8$ нм) и 3 кРл ($\lambda 630,0$ нм). Ось All-sky камер направлена в зенит. Направление луча радара PFISR было: азимут $154,3^\circ$, высота $77,5^\circ$. Данные, отображенные на (а) – (е), представляют зависимые от высоты развертки, полученные по данным PFISR в интервале 10:51 – 10:59 UT: (а) – электронная плотность N_e на высоте 150 – 450 км, полученная с помощью PFISR; (б) – распределение временных градиентов электронной плотности (dN_e/dt); (в) – распределение пространственных градиентов электронной плотности вдоль пучка (dN_e/dr). На (г) – профиль временного градиента dN_e/dt на высоте 137 км (правая шкала, оранжевые звездочки и пунктир); профиль пространственного градиента dN_e/dr на высоте 137 км (правая шкала, черные крестики и пунктир) и профиль индекса фазовой синцитилляции (шкала слева) $\sigma_\phi > 0,6$ цикла (черным), $\sigma_\phi < 0,2$ цикла (зеленым), $0,2 < \sigma_\phi < 0,6$ цикла (красным). На (д) показаны высотные профили электронной концентрации (цветом выделены профили, полученные 19, 20 и 21 декабря 2015 по мере развития суббури).

На (е) – интегрированные (по спектру) All-sky изображения из селективных изображений эмиссий 557,7 нм, 427,8 нм и 630,0 нм, полученных системой камер DASC на Аляске, причем каждое изображение соответствует времени вертикальных красных пунктирных линий на (а – г), красные пунктирные дуги на изображениях представляют проекцию траектории прохода GPS-спутника, а красной звездочкой отмечено его расположение в момент экспозиции изображений эмиссий камерой All-sky. На (ж) представлены отношения интенсивностей эмиссий (557,7/427,8, 630,0/427,8 и

630,0/557,7), нанесенные на график от интенсивности эмиссии 427,8 нм (в Рэлях) по оси абсцисс для авроральных изображений, показанных на (е). На (з) представлена кеограмма интенсивностей эмиссий в увеличенном масштабе для интервала 10:15 до 11:15 UT со шкалой интенсивности (цветом) для каждой эмиссии, показанной справа. Здесь анализируемый интервал 10:51 – 10:59 UT обведен красной рамкой, вертикальные белые пунктирные линии соответствуют времени съемки четырех изображений на (е). Авторы [19] пересчитали значения отношений интенсивностей 630,0/427,8 в значения характеристической энергии высыпающихся электронов и получили, что $\alpha \sim 1,5 - 4$ кэВ согласно [35, 36]. Эти величины соответствуют средней энергии электронов при Максвелловском распределении $E_{cp} \sim 3 - 8$ кэВ в рассматриваемом интервале времени, что в свою очередь соответствует высотам производства электронно-ионных пар $\sim 115 - 130$ км [37]. В пределах разрешения PFISR эти величины соответствуют максимумам электронной плотности на высотных профилях N_e , полученных при радарных наблюдениях (д) [19]. Профили N_e , показанные темно-серым цветом, были получены 21.12.2015, а зеленые и красные – 19 и 20 декабря соответственно, они по времени соответствуют All-sky изображениям под ними. На основе всей представленной информации на рис. 3 авторы сделали заключение, что источником градиентов N_e при документированных 21.12.2015 фазовых синцитилляциях были структурированные высыпания авроральных электронов, и, как следствие, неоднородности, образованные за счет ионизации при столкновениях высыпающихся электронов с молекулами и атомами в E -слое ионосферы, причем синцитилляционные события и градиенты N_e присутствовали на границах последовательных дискретных дуг полярных сияний, которые были на пути GPS-сигналов и пучка лучей радара PFISR.

2. Перспективный эксперимент на малых космических аппаратах с орбитальным комплексом аппаратуры «Аврора» и его методические преимущества. На симпозиуме в г. Калуге в сентябре 2018 г. было представлено предложение ИКИ РАН [38] по проведению перспективного эксперимента с комплексом приборов «Аврора», установленному на трёх малых космических аппаратах (МКА), нацеленных на исследования связей характеристик синцитилляций навигационных сигналов со структурами высыпаний авроральных электронов и сопутствующих им структурам авроральных эмиссий. На рис. 4 показана геометрия такого эксперимента, когда расстояние между двумя парами МКА из трех, следующих

друг за другом, составляет ~150 км. Комплекс аппаратуры «Аврора» включает три прибора: изображающую камеру «Летиция-микро», включающую два параллельных изображающих канала, настроенные на авроральные эмиссии $\lambda 427,8$ нм (N_2^+) и $\lambda 630,0$ нм [OI] с полями зрения $\sim 30^\circ$; анализатор энергетических распределений высыпавшихся электронов (электронный компактный спектрометр – ЭКОС) в диапазоне от 100 эВ до 15 кэВ и феррозондовый магнитометр. Методическая часть этого предложения заключается в следующем. Поля зрения авроральных имаджеров «Летиция-микро» на каждой паре из трех МКА частично перекрываются, как показано на рис. 4. Это позволяет «видеть» одни и те же авроральные структуры в разных ракурсах,

поэтому изображения их фрагментов послужат основой для 3D-реконструкций наблюдаемых эмиссий как в E -области ($\lambda 427,8$ нм (N_2^+)), так и в F -области ($\lambda 630,0$ нм [OI]). Интенсивность эмиссии $\lambda 427,8$ нм (N_2^+) функционально связана с концентрацией N_e на высотах E -области [39], а максимум интенсивности кислородной эмиссии находится в F -слое на высотах 230 – 270 км. При этом, так как проекция магнитной силовой линии (м. с. л.), которую пересекает каждый из трёх МКА, всегда попадает, как минимум, в поле зрения одного имаджера, то, используя операцию трассирования вдоль м. с. л. с помощью программного обеспечения (ПО) «Вектор-М» [40], всегда можно идентифицировать интенсивность эмиссий на высотах E - и F -слоя в тех пикселях матричных детекторов, в которые проецируется м. с. л., пересекаемая одним из МКА в «момент» экспозиции. Так как на каждом МКА будет установлен спектрометр ЭКОС, а в изображениях эмиссий, получаемых с каждой камеры, всегда будет присутствовать проекция м. с. л., которую в момент экспозиции изображения пересекает конкретный МКА, то сопряженные по м. с. л. интенсивности позволят с помощью модели транспорта заряженных частиц [41] «откалибровать» среднюю энергию электронов в объёме м. с. л. между F - и E -слоем по спектрам высыпавшихся частиц, полученным с ЭКОС и, в конечном счёте, уточнять $E_{cp} = f(I_{630})/(I_{427,8})$ для наблюдаемого объёма [36, 42]. Мелкомасштабные градиенты магнитного поля, измеряемые магнитометром на каждом МКА, позволят фиксировать продольные токи, сопутствующие границам авроральных структур разных масштабов. Из рис. 4 видно, что цилиндр STEC (на пути сигнала между навигационным спутником и приёмником) пересекает объём наблюдаемых эмиссий, что позволяет определять на высотах измеряемых эмиссий, т. е. в E - и F -слое, дифференциальную величину dN_e (см. рис. 1), входящую в интеграл STEC. В случае 3D-реконструкции эта величина должна быть нормирована на единицу объёма. В [43] была предложена комплексная методика наблюдений характеристик полярной ионосферы, включая координированные наблюдения авроральных эмиссий с орбит МКА и наземной станции ПГИ РАН (г. Апатиты).

3. Предварительные характеристики комплекса приборов «Аврора». Предварительные характеристики спектрометра ЭКОС, а также его принципиальное устройство показаны на рис. 5, а [44]. На рис. 5, б, показаны внешний облик аврорального имаджера «Летиция-микро» и его основные характеристики, а все характеристики,

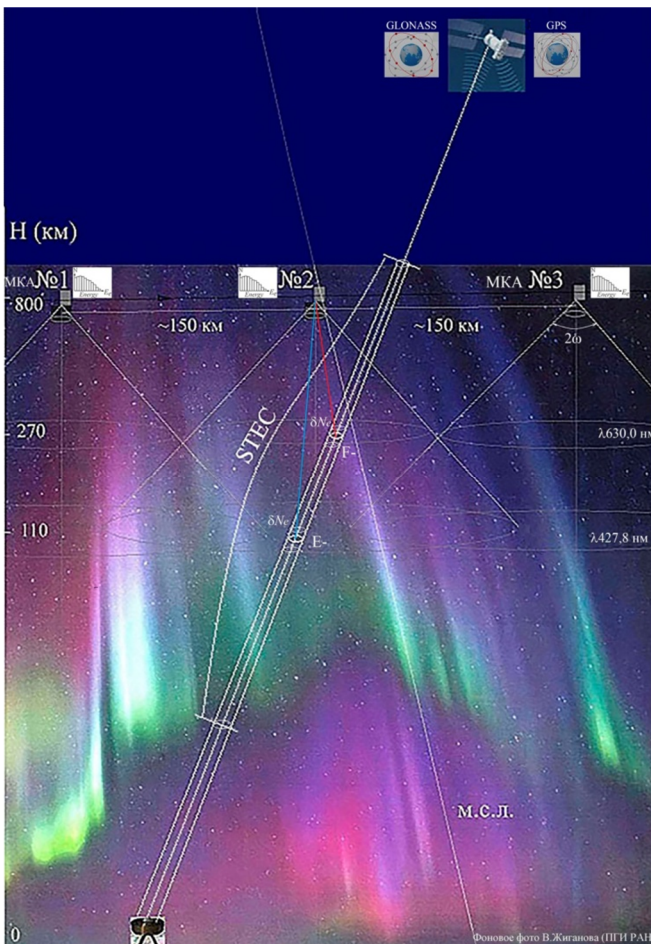
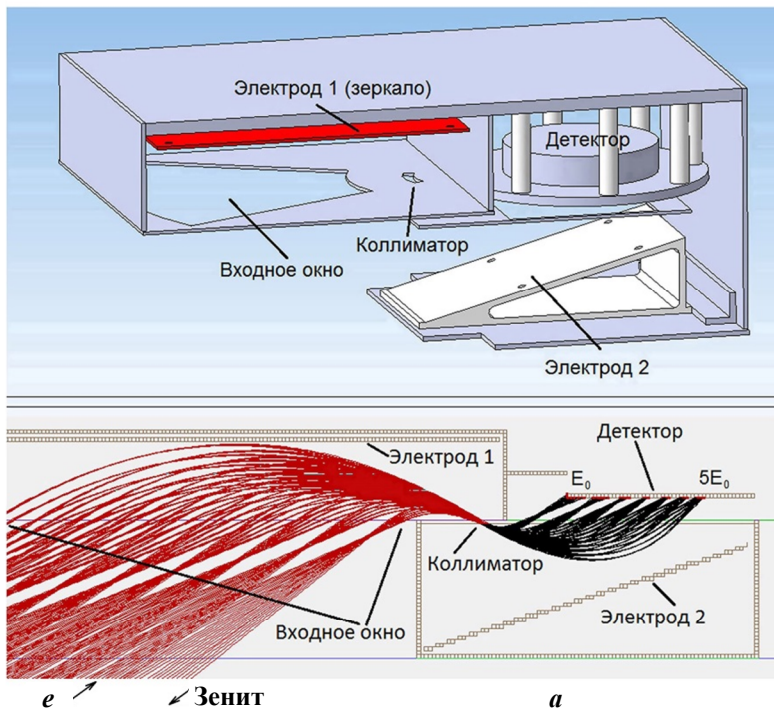
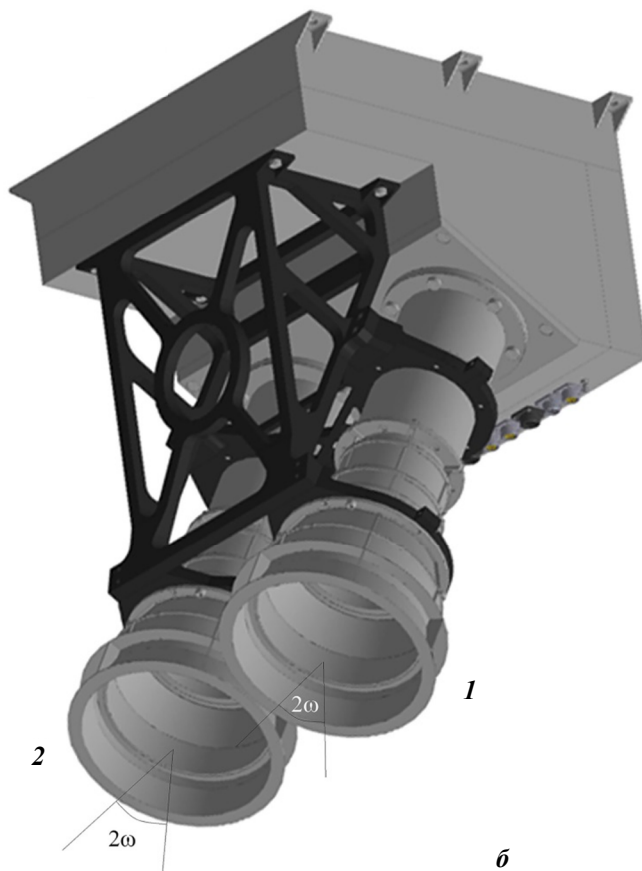


Рис. 4. Геометрия наблюдений авроральных эмиссий в E - и F -слое полярной ионосферы, одновременных измерений спектральных распределений высыпавшихся электронов и мелкомасштабных градиентов магнитного поля (не показаны) с орбит перспективных МКА, на которых будет установлен комплекс аппаратуры «Аврора», одновременно с работой приёмников сигналов навигационных систем ГЛОНАСС и GPS, пересекающих авроральную структуру, наблюдаемую с орбит МКА



Характеристики ЭКОС:
 Энергетический диапазон
 $E_e = 30 \text{ эВ} - 15 \text{ кэВ}$
 Разрешение по энергии $< 15\%$
 Поле зрения $\approx 50^\circ \times 5^\circ$
 Масса $< 1000 \text{ г}$
 Потребление $< 3 \text{ Вт}$
 Габаритные размеры
 $100 \times 60 \times 60 \text{ мм}$



Характеристики «Летиция-микро»:
 Углы полей зрения каналов
 $2\omega = 30^\circ$
 Диапазон чувствительности
 $50 \text{ Рл} - 100 \text{ кРл}$
 Потребление $< 15 \text{ Вт}$
 Масса $< 7 \text{ кг}$
 Направление осей: надир

Рис. 5. Принципиальное устройство электронного компактного спектрометра ЭКОС (а) [Вайсберг и др., 2018], внешний облик двухканального имаджера авроральных эмиссий «Летиция-микро» (б) и их характеристики [49]: 1 – $\lambda 630,0 \text{ нм}$; 2 – $\lambda 427,8 \text{ нм}$

принципиальное устройство и оптическую схему можно увидеть в [45]. За всю историю космических исследований на орбитах МКА работало только два имаджера, нацеленных на получение изображений авроральных эмиссий: Multispectral Auroral Imager (MAI) на японском МКА REIMEI, запущенном в 2005 г. [46], и Fast Auroral Imager (FAI) на канадском МКА E-POP, запущенном в 2013 г. [47]. Сравнительные характеристики этих приборов и примеры изображений наблюдаемых авроральных эмиссий были проанализированы в [24, 48].

4. Специальные требования к МКА и орбите со стороны комплекса аппаратуры «Аврора».

1. Характеристики орбиты: полярная круговая; высота $H \sim 800 - 850$ км; угол наклона плоскости орбиты к плоскости экватора $i \sim 80 - 82^\circ$; расположение плоскости орбиты в меридиональной плоскости геомагнитного местного времени $\sim 01 - 13$ MLT.

2. Расстояние между каждым МКА в пределах 100 – 200 км.

3. Режим ориентации строительных осей МКА в пространстве должен обеспечивать возможность дистанционной съемки авроральных структур в конкретных эмиссиях за время экспозиции $\sim 0,05 - 0,2$ с, при этом ось ($-Z$) МКА может быть отклонена от направления в надир не более, чем на 2° , и за время экспозиции не отклонилась на угол более 2 угл. мин. Точность контроля ориентации осей МКА в пространстве на неосвещенной стороне должна быть не хуже 15 угл. с, что может быть обеспечено при помощи ИК-датчика горизонта и звездного ориентатора на борту каждого МКА.

4. Возможность запоминания информации на «глухих» витках в объёме не менее 1 Гбайт/виток и её передачи в зоне видимости приемных пунктов в России.

5. Создаваемая методика комплексной локальной диагностики состояния полярной ионосферы с орбит МКА, нацеленная на исследования условий и процессов в авроральном овале и полярной шапке, влияющих на распространение сигналов навигационных и других систем строится на основе: результатов комплексных экспериментов и опыта, полученных в нескольких орбитальных и наземных зарубежных проектах, рассмотренных в данной работе и серии других работ, на основе экспериментально-методического задела в ИКИ РАН, дополнительного эскизного проекта «Авровизор-ВИС/МП» [24], эскизного проекта двухканального имаджера «Летиция-микро» [45]. В проекте на МКА различными методами будут фиксироваться локальные мелкомасштабные неоднородности плотности плазмы полярной ионосферы на высотах E - и F -слоя одновременно с нескольких МКА в од-

ном секторе MLT, а также с поверхности Земли и трасс беспилотных летательных аппаратов в нескольких секторах аврорального овала и полярной шапки, включая дневной полярный касп, синхронно с работой спутников и приемников GNSS. На основе анализа орбит серии спутников глобальных навигационных систем, работающих с приемниками сигналов в конкретных точках полярной зоны, и орбит МКА с помощью ПО «Вектор-М» [40, 49] будут прогнозироваться интервалы времени их пролёта над окрестностями этих точек, пролёта над конкретными точками наблюдений на Земле, а также зоны перекрытия полей наблюдений авроральных имаджеров на «соседних» (рис. 4) МКА. Кроме данных об амплитудных и фазовых сцинтилляциях сигналов конкретных PRN GNSS и TEC и изображений авроральных эмиссий для анализа будут использоваться: данные измерений энергетических распределений высыпающихся электронов в окрестности каждого МКА, данные 3-х компонент магнитного поля, и данные, полученные с поверхности Земли: изображения авроральных эмиссий, получаемые в конкретных точках наземных станций и обсерваторий, данные сети наземных магнитометров и риометров, данные радаров обратного рассеяния о локальных концентрациях N_e на разных высотах. Существенно дополнить вклад в реализацию методики могут: локальные синхронные наблюдения неоднородностей N_e с зондирующих ракет в окрестности конкретных м. с. л., а также глобальные ВУФ-изображения полярной ионосферы с орбиты типа «Молния», которые обеспечат информацию о естественных границах магнитосферы в момент возникновения сцинтилляций и данные для крупномасштабной диагностики состояния ионосферы в полярной шапке и авроральном овале во всех секторах MLT одновременно [33]. Такой перспективный проект Solar wind Magnetosphere Ionosphere (SMILE) готовится European Space Agency (ESA) в кооперации со специалистами Канады, Китая и Бельгии (URL : <http://sci.esa.int/jump.cfm?oid=5914>).

5. Роль оптической диагностики авроральных эмиссий с орбиты МКА как части перспективной методики.

1. Получение изображений авроральных эмиссий одних и тех же авроральных структур с пространственным разрешением $\sim 1 \times 1$ км и временным разрешением 0,05 – 0,2 с в разных ракурсах с двух МКА одновременно, «расположенных» на расстояниях ~ 150 км друг от друга в одной плоскости орбит. Использование 3D-реконструкций получаемых локальных изображений авроральных структур для получения 3D-структуры электронной concentra-

ции на высотах E - и F -областей. Возможные алгоритмы 3D-реконструкций орбитальных локальных изображений авроральных эмиссий см. в [50].

2. Анализ изображений авроральных эмиссий в окрестности подножных точек foot point ($f.p.$) м. с. л. и особенно, когда $f.p.$ находится вблизи координат (MLAT-MLT) наземных станций и радаров, и выявление корреляций радиосигналов с взаимным расположением градиентов плотности плазмы на высотах E - и F -областей ионосферы и локальными структурами высыпавшихся электронов, их пространственными и энергетическими характеристиками (поток энергии и средней энергией), определяемыми как по данным спектрометра ЭКОС окрестности МКА, так и дистанционно по отношениям интенсивности авроральных эмиссий (в рамках полей наблюдений), а также с градиентами магнитного поля, соответствующими мелкомасштабным продольным токам. Выявление градиентов и неоднородностей N_e в E - и F -областях ионосферы (дистанционно в рамках полей наблюдений эмиссий) как в авроральном овале, так и в полярной шапке. Так как неоднородности на разных высотах связаны магнитными силовыми линиями, вдоль которых происходят высыпания заряженных частиц, то выявление пространственной корреляции сцинтилляций радиосигналов конкретных КА GNSS в точках протыкания ионосферы (IPP) с конкретными авроральными мелкомасштабными структурами с различной морфологией, на высотах E - и F -слоев ионосферы одновременно позволит приблизиться к решению рассматриваемых задач.

Заключение

Рассмотрены характеристики полярной ионосферы, полученные в комплексных исследовательских работах над Скандинавией и над Аляской во время геомагнитных возмущений в 2015 г., синхронно с данными характеристик сцинтилляций сигналов ряда спутников GPS, «протыкающих» ионосферу на высотах как E -, так и F -области. Результаты этих проектов свидетельствуют о принципиальной важности локального контроля электронной концентрации на высотах ионосферы от 100 до 500 км и дистанционного контроля пространственных и энергетических характеристик высыпавшихся заряженных частиц, непосредственно влияющих на структурирование неоднородностей электронной концентрации, которые встречаются на пути сигналов в полярных областях. Именно они, изменяясь сами, изменяют коэффициент преломления среды, что приводит к фазовым и амплитудным сцинтилляциям сигналов. До сих пор нет

ясности в причинах мгновенной локализации фазовых и амплитудных сцинтилляций сигналов. Почему они возникают в окрестностях одних мелкомасштабных авроральных структур и не возникают в окрестности других (соседних) или значительно меняют свои индексы, и как эти причины связаны с динамикой образования и распределениями неоднородностей на разных высотах в различных секторах MLT. Рассмотренные примеры данных, включающие наземные и орбитальные результаты наблюдений структур интенсивности авроральных эмиссий и работы сцинтилляционных приемников GNSS, впервые оценены статистически [18]. Некоторые результаты этих исследований уже упоминались в [25]. Как для исследований причинно-следственных связей, так и для контроля характеристик полярной ионосферы принципиально важно научиться выявлять условия, способствующие образованию плазменных неустойчивостей и динамике неоднородностей плазмы в различных секторах полярной ионосферы, структуры которых подвержены воздействию высыпаний заряженных частиц. Именно они являются реальными источниками, приводящими к сцинтилляциям сигналов в F - и E -слое полярной ионосферы. Анализ результатов зарубежных комплексных наземных и орбитальных наблюдений характеристик полярной ионосферы в полярной шапке и авроральном овале, проведенных одновременно с контролем распространения навигационных сигналов, стимулировал разработку предлагаемой методики измерений характеристик полярной ионосферы [49] в рамках подготовки перспективного эксперимента на группировке российских МКА, в которой акцентировано внимание на роли оптических измерений авроральных эмиссий с орбиты с километровым пространственным разрешением.

Авторы уверены, что перспективные исследования механизмов влияния полярной ионосферы на характеристики распространения сигналов в этой среде и комплексный контроль, включая орбитальный, её состояния особенно в возмущенных геомагнитных условиях, важны в условиях интенсивного развития инфраструктуры протяженного Арктического региона России.

Сокращения

ВУФ – вакуумный ультрафиолет
ГЛОНАСС – глобальная навигационная спутниковая система
КА – космический аппарат
МКА – малый/микро космический аппарат
ММП – межпланетное магнитное поле

м. с. л. – магнитная силовая линия
 ПО – программное обеспечение
 ЭКОС – электронный компактный спектрометр
 EISCAT – European Incoherent SCATter
 EMCCD – Electron multiplying charge coupled device
 ESA – European Space Agency
 FAI – Fast Auroral Imager
f. p. – foot point
 GDI – Gradient Drift Instability
 GISTM – GPS Ionospheric Scintillation and TEC Monitor
 GNET – Greenland GPS Network
 GNSS – Global Navigation Satellite Systems – гло-
 бальная навигационная спутниковая система
 GPS – Global Positioning System navigation satellites –
 система глобального позиционирования
 IGS – International GPS Service
 IPP – Ionospheric Pierce Point (Psi)
 KHI – Kelvin-Helmholtz Instability
 LBH – Lyman Birdge Hopfield spectral bands
 MAC – Multispectral Auroral Imager
 MLAT – Magnetic Latitude
 MLT – Magnetic Local Time – геомагнитное
 местное время
 NMA – NATO Military Authorities
 OMNI – multisatellites solar-wind database
 PFISR – Poker Flat Incoherent Scatter Radar
 (near Fairbanks)
 PRN – Pseudo-Random Code (код псевдослучайного
 шума служит в GPS для идентификации конкретного
 спутника и определения дальности)
 PSD – power spectral density
 SMILE – Solar wind Magnetosphere Ionosphere Link
 Explorer
 TEC – Total Electron Content – общее электронное
 содержание
 SKN – Skybotn station
 STEC – Slant Total Electron Content
 UHF – Ultra High Frequency
 VTEC – Vertical Total Electron Content

Литература

1. Tsunoda R. T. High-latitude F-region irregularities: a review and synthesis / R. T. Tsunoda // *Rev. Geophys.* – 1988. – Vol. 26. – P. 719 – 760.
2. Basu S. Specification and forecasting of scintillations in communication and navigation links: Current status and future plans / S. Basu, K. Grovesa, S. Basu [at all] // *Journ. Atmos. Sol. Terr. Phys.* – 2002. – Vol. 64 (16). – P. 1745 – 1754. – Doi: 10.1016/S1364-6826(02)00124-4.
3. Kintner P. M. GPS and ionospheric scintillations / P. M. Kintner, B. M. Ledvina, E. R. de Paula // *Space Weather.* – 2007. – Vol. 5. – S09003. – Doi:10.1029/2006SW000260.
4. Prikryl P. GPS phase scintillation at high latitudes during the geomagnetic storm of 17 – 18 March 2015 / P. Prikryl, R. Ghoddoousi-Fard, J. M. Weygand [at all] // *Journ. Geophys. Res. Space Physics.* – 2016. – Vol. 121. – P. 10448 – 10465. – Doi:10.1002/2016JA023171.
5. Козлова М. О. Исследование неоднородностей километрового масштаба в F-области высокоширотной ионосферы по данным о мерцаниях спутниковых радиосигналов : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 25.00.29. / Козлова Марина Олеговна. – Мурманск : ПГИ РАН, 2002. – 120 с.
6. Huba J. D. Linear theory of the E x B instability with an inhomogeneous electric field / J. D. Huba, S. L. Ossakow, P. Satyanarayana [at all] // *Journ. Geophys. Res.* – 1983. – V. 88. – P. 425 – 434.
7. Cerisier J. C. Unstable density gradients in the high-latitude ionosphere / J. C. Cerisier, J. J. Berthelier, C. Beghin // *Radio Sci.* – 1985. – Vol. 20. – N. 4 – P. 755 – 761.
8. Basu Su. Plasma structuring by the gradient drift instability at high latitudes and comparison with velocity shear driven processes / Su. Basu, S. Basu, E. MacKenzie [at all] // *Journ. Geophys. Res.* – 1990. – Vol. 95. – Iss. A6. – P. 7799 – 7818. – Doi: 10.1029/JA095iA06p07799.
9. Sojka J. J. Gradient drift instability growth rates from global-scale modeling of the polar ionosphere / J. J. Sojka, M. V. Subramaniam, L. Zhu [at all] // *Radio Science.* – 1998. – Vol. 33. – N. 6. – P. 1915 – 1928.
10. Carlson H. C. Case for a new process, not mechanism, for cusp irregularity production / H. C. Carlson, T. Pedersen, S. Basu [at all] // *Journ. Geophys. Res.* – 2007. – Vol. 112. – A11304. – Doi: 10.1029/2007JA012384.
11. Moen J. First in-situ measurements of HF radar echoing targets / J. Moen, K. Oksavik, T. Abe [at all] // *Geophys. Res. Lett.* – 2012. – Vol. 39. – L07104. – Doi: 10.1029/2012GL051407.
12. Moen J. Space weather challenges of the polar cap ionosphere / J. Moen, K. Oksavik, L. Alfonsi [at all] // *Journ. Space Weather Space Clim.* – 2013. – Vol. 3. – A02. – P. 1 – 13. – Doi: 10.1051/swsc/2013025.
13. Spicher A. Plasma turbulence and coherent structures in the polar cap observed by the ICI-2 sounding rocket / A. Spicher, W. J. Miloch, L. B. N. Clausen [at all] // *Journ. Geophys. Res. Space Physics.* – 2015. – Vol. 120. – Iss.12. – P. 10959 – 10978. – Doi: 10.1002/2015JA021634.
14. Paschmann G. Auroral plasma physics / G. Paschmann, S. Haaland, R. Treumann // *Space Sci. Rev.* – 2002. – Vol. 103. – № 1 – 4. – 485 p. – Doi: 10.1023/A:1023030716698.
15. Hoffmann-Wellenhof, B. GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo and More / B. Hoffmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, E. Wasle. – Vienna : Springer-Verlag, 2008. – 516 p.
16. Sokolova N. High Latitude Phase Scintillation Decorrelation Across GNSS Frequencies-Exploring the impact of scintillation on multi-frequency users / N. Sokolova, A. Morrison, J. Curran // *Journ. Space Weather Space Clim.* – 2017. – Vol. 7. – A26. – P. 45 – 51. – Doi: https://doi.org/10.1051/swsc/2017020.
17. Tuna H. Online user-friendly slant electron content computation from IRI-Plas: IRI-Plas-TEC / H. Tuna, O. Arikani, F. Arican [at all] // *Space weather.* – 2014. – Vol. 12. – P. 64 – 75. – Doi: 10.1002/2013SW000998.
18. Jin Y. GPS scintillation and losses of signal lock at high latitudes during the 2015 St.Patrick's day storm / Y. Jin,

- K. Oksavik // *Journ. Geophys. Res.* – 2018. – Vol. 123. – P. 7943 – 7957. – Doi: 10.1029/2018JA025953.
19. Loucks D. High-latitude GPS phase scintillation from E region electron density gradients during the 20-21 December 2015 geomagnetic storm / D. Loucks, S. Palo, M. Pilinski [at all] // *Journ. Geophys. Res.* – 2016. – Vol. 122. – P. 7473 – 7490. – Doi: 10.1002/2016JA023839.
20. Chartier A. Three-dimensional modeling of high-latitude scintillation observations / A. Chartier, B. Forte, K. Deshpande [at all] // *Radio Sci.* – 2016. – Vol. 51. – P. 1022 – 1029. – Doi: 10.1002/2015RS005889.
21. Semeter J. GPS signal corruption by the discrete aurora: precise measurements from the Mahali experiment / J. Semeter, S. Mrak, M. Hirsch [at all] // *Geophys. Res. Lett.* – 2017. – Vol. 44. – N. 19. – P. 9539 – 9546. – Doi: 10.1002/2017GL073570.
22. Forte B. Identification of scintillation signatures on GPS signals originating from plasma structures detected with EISCAT incoherent scatter radar along the same line of sight / B. Forte, C. Coleman, S. Skone [at all] // *Journ. Geophys. Res. Space Physics.* – 2017. – Vol. 122 (1). – P. 916 – 931. – Doi: 10.1002/2016JA023271.
23. Mende S. B. Observing the magnetosphere through global auroral imaging: 1. Observables / S. B. Mende // *Journ. Geophys. Res.: Space Physics.* – 2016. – Vol. 121. – Issue 10. – P. 10623 – 10637. – Doi: 10.1002/2016JA022607.
24. Кузьмин А. К. Прикладные аспекты измерений авроральных эмиссий и характеристик полярной ионосферы имаджером Авровизор-ВИС/МП на перспективном КА «Метеор-МП» / А. К. Кузьмин, А. М. Мерзлый, М. А. Баньщикова [и др.] // *Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. Приложение за 2016 год. Материалы четвертой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли».* – М.: АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2016. – С. 325 – 341.
25. Кузьмин А. К., Мерзлый А. М. Дистанционная оптическая диагностика состояния полярной ионосферы в различных диапазонах спектра на основе данных наблюдений орбитального аврорального имаджинга. Часть 2 (видимый и ВУФ-диапазон) / А. К. Кузьмин, А. М. Мерзлый // *Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ.* – М.: АО «Корпорация ВНИИЭМ», 2019. – Т. 168. – № 1. – С. 19 – 43.
26. Jin Y. GPS scintillations associated with cusp dynamics and polar cap patches / Y. Jin, J. I. Moen, K. Oksavik [at all] // *Journ. Space Weather Space Clim.* – 2017. – Vol. 7. – Iss. A23. – P. 1 – 12. – Doi: 10.1051/swsc/2017022.
27. Paxton L. J. Validation of remote sensing products produced by the Special Sensor Ultraviolet Scanning Imager (SSUSI) – a far-UV imaging spectrograph on DMSP F16 / L. J. Paxton, D. Morrison, Y. Zhang [at all] // *Proc. SPIE. Optical Spectroscopy Techniques, Remote Sensing, and Instrumentation for Atmospheric and Space Research IV.* – 2002. – Vol. 4485. – P. 338 – 348.
28. Holtzworth R. H. Mathematical representation of the auroral oval / R. H. Holtzworth, C.-I. Meng // *Geophys. Res. Lett.* – 1975. – Vol. 2 – N. 9. – P. 377 – 380.
29. Büssov R. An algorithm for continuous Morlet wavelet transform / R. Büssov // *Mechanical systems and signal processing.* – 2007. – Vol. 21. – Iss. 8. – P. 2970 – 2979.
30. Liner Ch. An overview of wavelet transform concepts and applications / Ch. Liner. – Houston: University of Houston, 2010.
31. Germany G. A. Auroral observations from the POLAR Ultraviolet Imager (UVI) / G. A. Germany, J. F. Spann, G. K. Parks [at all] // *Geospace Mass and Energy Flow: Results the International Solar-terrestrial Physics Program. Geophys. Monogr. Ser.;* edited by J. L. Horwitz, D. L. Gallagher and W. K. Peterson. – D. C. Washington. – Vol. 104. – 1998. – P. 149 – 160.
32. Strickland D. J. Dependence of auroral FUV emissions on the incident electron spectrum and neutral atmosphere / D. J. Strickland, J. R. Jasperse, J. A. Whalen // *Journ. Geophys. Res.* – 1983. – Vol. 88. – N. A10. – P. 8051 – 8062.
33. Кузьмин А. К. Дистанционная оптическая диагностика состояния полярной ионосферы в различных диапазонах спектра на основе данных наблюдений орбитального аврорального имаджинга. Часть 1 (ВУФ-диапазон) / А. К. Кузьмин, А. М. Мерзлый // *Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ.* – М.: АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2018. – Т. 167. – № 6. – С. 9 – 41.
34. Mende S. B. The THEMIS array of ground-based observatories for the study of auroral substorms / S. B. Mende, S.E. Harris, H.U. Frey [at all] // *Space Sci. Rev.* – 2008. – Vol. 141. – P. 357 – 387. – Doi: 10.1007/s11214-008-9380-x.
35. Rees, M. H. Auroral electron energy derived from ratio of spectroscopic emissions 1. Model computations / M. H. Rees, D. Luckey // *Journ. Geophys. Res.* – 1974. – Vol. 79. – N. 34. – P. 5181 – 5186. – Doi: 10.1029/JA079i034p05181.
36. Steel D. P. Electron auroral excitation efficient and intensity ratios / D. P. Steel, D. J. McEwen // *Journ. Geophys. Res.* – 1990. – Vol. 95. – P. 10321 – 10336.
37. Schunk, R. *Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry* / R. Schunk, A. Nagy. – 2nd ed. – Vol. 1. – Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2009. – 628 p.
38. Кузьмин А. К. Авроральные эмиссии, высыпаящиеся электроны и ионы и градиенты магнитного поля как объекты исследований малым комплексом «Аврора» на малом КА и локальной диагностики состояния полярной ионосферы [Электронный ресурс]: презентация / А. К. Кузьмин, О. Л. Вайсберг, А. Ю. Шестаков [и др.] // *Симпозиум «Современные проблемы создания российских малых космических аппаратов и их использования для решения социально-экономических задач, секция А.* – Калуга, 2018. – 27 слайдов.
39. Vondrak R. R. Remote sensing of high-latitude ionization with the ISIS 2 auroral scanning photometer / R. R. Vondrak, J. S. Murphree, C. D. Anger // *Radio Science.* – 1985. – Vol. 20. – N. 3. – P. 439 – 446.
40. Баньщикова М. А. 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.
41. Дашкевич Ж. В. Фотометрия и моделирование излучений полярных сияний : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 25.00.29 / Дашкевич Жанна Владимировна. – Апатиты : ПГИ РАН, 2005. – 145 с.
42. Banshchikova M. A. Influence of magnetically conjugate fragments of auroral emission images of the accuracy of determining Eav of precipitating electrons / M. A. Banshchikova, I. N. Chuvashov, A. K. Kuzmin [at all] // Russian Physics Journal. – 2018. – Vol. 61. – N. 1. – P. 150 – 156. – Doi:10.1007/s 11182018-1378-6.
43. Козлов Б. В. Разработка методологии оперативного прогноза мелкомасштабных флуктуаций полярной ионосферы в интересах повышения эффективности работы систем навигации и радиолокации [Электронный ресурс] : презентация / Б. В. Козлов, А. К. Кузьмин, П. П. Моисеев // Презентация на секции Совета по космосу РАН. – 2019. – 49 слайдов.
44. Вайсберг О. Л. Комплекс малогабаритных приборов для исследования космической погоды / О. Л. Вайсберг, А. Ю. Шестаков, С. Д. Шувалов [и др.] // Изв. вузов, Приборостроение. – 2018. – Т. 61. – № 5. – С. 399 – 402.
45. Доброленский Ю. С. Исследования авроральных характеристик и высотно-широтной структуры эмиссий верхней атмосферы и ионосферы Земли с использованием метода пространственных реконструкций изображений, полученных с высоты орбиты перспективного микроспутника / Ю. С. Доброленский, Б. В. Козлов, А. К. Кузьмин [и др.] // Сб. Исследования солнечно-земных связей на микро-, нано- и пикоспутниках (материалы научной сессии секции солнечно-земных связей совета по космосу российской академии наук). – М. : ИКИ РАН, 2015. – С. 61 – 76.
46. Obuchi Y. Initial observations of auroras by multi-spectral auroral camera on board the REIMEI satellite / Y. Obuchi, T. Sakanoi, A. Yamazaki [at all] // Earth Planet Space. – 2008. – Vol. 60. – N 8. – P. 827 – 835.
47. Cogger L. Fast Auroral Imager (FAI) for e-POP Mission / L. Cogger, A. Howarth, A. Yau // Space Sci. Rev. – 2014. – Vol. 189. – P. 15 – 25. – Doi:10.1007/s11214-014-0107-x.
48. Кузьмин А. К. 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 [Электронный ресурс] / А. К. Кузьмин, М. А. Баныщикова, Ю. С. Доброленский [и др.] // Практические аспекты гелиогеофизики. – М. : ИКИ РАН, 2016. – С. 114 – 133. – Режим доступа : <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/201601.pdf>, свободный.
49. Avdyushev V. A. Capabilities of software «Vector-M» for a diagnostics of the ionosphere state from auroral emissions images and plasma characteristics from the different orbits as a part of the system of control of space weather [Электронный ресурс] / Avdyushev V. A., Banshchikova M. A., Chuvashov I. N. [at all] // European Planetary Science Congress 2017 ; EPSC2017-834-1. – Tomsk : Tomsk State University, 2017. – Vol. 11. – 2017. – PDF формат 2017EPSC.PDF.
50. Кузьмин А. К. Преимущества наблюдений авроральных структур с двух орбит и возможности для реконструкции 3D-распределений эмиссий, получаемых с разных позиций имаджеров / А. К. Кузьмин, М. А. Баныщикова, И. Н. Чувашов [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М. : АО «Корпорация ВНИИЭМ», 2017. – Т. 158. – № 3. – С. 7 – 21.

Поступила в редакцию 15.04.2019

Александр Константинович Кузьмин, кандидат физико-математических наук, главный специалист, т. (495) 333-20-00, e-mail: alkkuzmin@mail.ru.

Олег Леонидович Вайсберг, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, т. (495) 333-34-56, e-mail: olegv@iki.rssi.ru.

Сергей Дмитриевич Шувалов, младший научный сотрудник, т. (495) 333-41-88, e-mail: shuvalovsergey@gmail.com. (ИКИ РАН).

Артем Юрьевич Шестаков, младший научный сотрудник, т. (495) 333-41-88, e-mail: sartiom1@yandex.ru.

Григорий Михайлович Крученицкий, доктор физико-математических наук, заведующий отделом, т. (495) 408-61-41, e-mail: omd@cao-rhms.ru. (ФГБУ ЦАО Росгидромета).

Мария Александровна Баныщикова, кандидат физико-математических наук, доцент, т. (3822) 529-776, e-mail: mba-tomsk@mail.ru. (НИИ ПМ ТГУ).

METHODOLOGY OF DIAGNOSTICS OF INTENSITY DISTRIBUTIONS OF AUROAL EMISSIONS FROM THE ORBITS SIMULTANEOUSLY WITH MEASUREMENTS OF PLASMA CHARACTERISTICS AND ITS'S ROLE IN RESEARCH AND MONITORING OF THE PROPAGATION CONDITIONS OF NAVIGATION SYSTEMS IN THE POLAR IONOSPHERE

A. K. Kuzmin, O. L. Vaisberg, S. D. Shuvalov,
A. Yu. Shestakov, G. M. Kruchenitskii, M. A. Banshchikova

With representative examples of specific events, the results of complex observations are considered in term of the influence of polar ionosphere on the characteristics of signals propagation from orbital navigation systems under conditions of geomagnetic disturbances, and role of optical diagnostics data in signal scintillation locations in the F and E regions of the ionosphere are analyzed. As part of the preparation of promising Russian orbital and ground-based experiments aimed at carrying out complex measurements of the polar ionosphere characteristics, including obtaining images of auroral structures and their fragments in emissions of the visible spectral region, the version of the method of observing auroral features from small spacecraft orbits simultaneously with the characteristics of received signals intersecting these fragments was proposed.

Key words: polar ionosphere state diagnostics, electron concentration inhomogeneities, auroral emissions, fragments of auroral structures, auroral oval, polar cap, auroral imager, orbital navigation system scintillations.

References

1. Tsunoda R.T. High-latitude F-region irregularities: a review and synthesis / R.T. Tsunoda // *Rev. Geophys.* – 1988. – Vol. 26. – P. 719 – 760.
2. Basu S. Specification and forecasting of scintillations in communication and navigation links: Current status and future plans / S. Basu, K. Grovesa, S. Basu [et al.] // *Journ. Atmos. Sol. Terr. Phys.* – 2002. – Vol. 64 (16). – P. 1745 – 1754. – Doi: 10.1016/S1364-6826(02)00124-4.
3. Kintner P. M. GPS and ionospheric scintillations / P. M. Kintner, B. M. Ledvina, E.R. de Paula // *Space Weather.* – 2007. – Vol. 5. – S09003. – Doi:10.1029/2006SW000260.
4. Prikryl P. GPS phase scintillation at high latitudes during the geomagnetic storm of 17 – 18 March 2015 / P. Prikryl, R. Ghoddoosi-Fard, J. M. Weygand [et al.] // *Journ. Geophys. Res. Space Physics.* – 2016. – Vol. 121. – P. 10448 – 10465. – Doi:10.1002/2016JA023171.
5. Kozlova M. O. Study of kilometer-scale inhomogeneities in F-region of high-latitude ionosphere using data on radio signal scintillations : thesis for a Candidate Degree in Physics and Mathematics : 25.00.29 / Kozlova Marina Olegovna. – Murmansk : Polar Geophysical Institute of RAS, 2002. – 120 p.
6. Huba J. D. Linear theory of the E x B instability with an inhomogeneous electric field / J. D. Huba, S. L. Ossakow, P. Satyanarayana [et al.] // *Journ. Geophys. Res.* – 1983. – V. 88. – P. 425 – 434.
7. Cerisier J. C. Unstable density gradients in the high-latitude ionosphere / J. C. Cerisier, J. J. Berthelier, C. Beghin // *Radio Sci.* – 1985. – Vol. 20. – N. 4 – P. 755 – 761.
8. Basu Su. Plasma structuring by the gradient drift instability at high latitudes and comparison with velocity shear driven processes / Su. Basu, S. Basu, E. MacKenzie [et al.] // *Journ. Geophys. Res.* – 1990. – Vol. 95. – Iss. A6. – P. 7799 – 7818. – Doi: 10.1029/JA095iA06p07799.
9. Sojka J. J. Gradient drift instability growth rates from global-scale modeling of the polar ionosphere / J. J. Sojka, M. V. Subramaniam, L. Zhu [et al.] // *Radio Science.* – 1998. – Vol. 33. – N. 6. – P. 1915 – 1928.
10. Carlson H. C. Case for a new process, not mechanism, for cusp irregularity production / H. C. Carlson, T. Pedersen, S. Basu [et al.] // *Journ. Geophys. Res.* – 2007. – Vol. 112. – A11304. – Doi: 10.1029/2007JA012384.
11. Moen J. First in-situ measurements of HF radar echoing targets / J. Moen, K. Oksavik, T. Abe [et al.] // *Geophys. Res. Lett.* – 2012. – Vol. 39. – L07104. – Doi: 10.1029/2012GL051407.
12. Moen J. Space weather challenges of the polar cap ionosphere / J. Moen, K. Oksavik, L. Alfonsi [et al.] // *Journ. Space Weather Space Clim.* – 2013. – Vol. 3. – A02. – P. 1 – 13. – Doi: 10.1051/swsc/2013025.
13. Spicher A. Plasma turbulence and coherent structures in the polar cap observed by the ICI-2 sounding rocket / A. Spicher, W. J. Miloch, L.B.N. Clausen [et al.] // *Journ. Geophys. Res. Space Physics.* – 2015. – Vol. 120. – Iss.12. – P. 10959 – 10978. – Doi: 10.1002/2015JA021634.
14. Paschmann G. Auroral plasma physics / G. Paschmann, S. Haaland, R. Treumann // *Space Sci. Rev.* – 2002. – Vol. 103. – No. 1 – 4. – 485 p. – Doi: 10.1023/A:1023030716698.
15. Hoffmann-Wellenhof, B. GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo and More / B. Hoffmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, E. Wasle. – Vienna : Springer-Verlag, 2008. – 516 p.
16. Sokolova N. High Latitude Phase Scintillation Decorrelation Across GNSS Frequencies-Exploring the impact of scintillation on multi-frequency users / N. Sokolova, A. Morrison, J. Curran // *Journ. Space Weather Space Clim.* – 2017. – Vol. 7. – A26. – P. 45 – 51. – Doi: <https://doi.org/10.1051/swsc/2017020>.

17. Tuna H. Online user-friendly slant electron content computation from IRI-Plas: IRI-Plas-STE/C / H. Tuna, O. Arıkan, F. Arıcan [et al.] // *Space weather*. – 2014. – Vol. 12. – P. 64 – 75. – Doi: 10.1002/2013SW000998.
18. Jin Y. GPS scintillation and losses of signal lock at high latitudes during the 2015 St. Patrick's day storm / Y. Jin, K. Oksavik // *Journ. Geophys. Res.* – 2018. – Vol. 123. – P. 7943 – 7957. – Doi: 10.1029/2018JA025953.
19. Loucks D. High-latitude GPS phase scintillation from E region electron density gradients during the 20-21 December 2015 geomagnetic storm / D. Loucks, S. Palo, M. Pilinski [et al.] // *Journ. Geophys. Res.* – 2016. – Vol. 122. – P. 7473 – 7490. – Doi: 10.1002/2016JA023839.
20. Chartier A. Three-dimensional modeling of high-latitude scintillation observations / A. Chartier, B. Forte, K. Deshpande [et al.] // *Radio Sci.* – 2016. – Vol. 51. – P. 1022 – 1029. – Doi: 10.1002/2015RS005889.
21. Semeter J. GPS signal corruption by the discrete aurora: precise measurements from the Mahali experiment / J. Semeter, S. Mrak, M. Hirsch [et al.] // *Geophys. Res. Lett.* – 2017. – Vol. 44. – N. 19. – P. 9539 – 9546. – Doi: 10.1002/2017GL073570.
22. Forte B. Identification of scintillation signatures on GPS signals originating from plasma structures detected with EISCAT incoherent scatter radar along the same line of sight / B. Forte, C. Coleman, S. Skone [et al.] // *Journ. Geophys. Res. Space Physics*. – 2017. – Vol. 122 (1). – P. 916 – 931. – Doi: 10.1002/2016JA023271.
23. Mende S. B. Observing the magnetosphere through global auroral imaging: 1. Observables / S. B. Mende // *Journ. Geophys. Res.: Space Physics*. – 2016. – Vol. 121. – Issue 10. – P. 10623 – 10637. – Doi: 10.1002/2016JA022607.
24. Kuzmin A. K. Applied aspects of measurements of auroral emissions and polar ionosphere characteristics by the Aurovisor-VIS/MP imager installed on Meteor-MP / A. K. Kuzmin, A. M. Merzlyi, M. A. Banshchikova [et al.] // *Matters of Electromechanics. VNIIEM Proceedings. Appendix of 2016. Proceedings of IVth international scientific and technical conference 'Current issues of development of Earth remote sensing space systems'*. – M.: 'VNIIEM Corporation' JC, 2016. – Pp. 325 – 341.
25. Kuzmin A.K., Merzlyi A.M. Remote optical diagnostics of polar ionosphere condition in different spectral bands based on orbital auroral imaging data. Part 2 (visible and VUV bands) / A.K. Kuzmin, A.M. Merzlyi // *Matters of Electromechanics. VNIIEM Proceedings*. – M.: 'VNIIEM Corporation' JC, 2019. – Vol. 168. – No. 1. – Pp. 19 – 43.
26. Jin Y. GPS scintillations associated with cusp dynamics and polar cap patches / Y. Jin, J. I. Moen, K. Oksavik [et al.] // *Journ. Space Weather Space Clim.* – 2017. – Vol. 7. – Iss. A23. – P. 1 – 12. – Doi: 10.1051/swsc/2017022.
27. Paxton L.J. Validation of remote sensing products produced by the Special Sensor Ultraviolet Scanning Imager (SSUSI) – a far-UV imaging spectrograph on DMSP F16 / L. J. Paxton, D. Morrison, Y. Zhang [et al.] // *Proc. SPIE. Optical Spectroscopy Techniques, Remote Sensing, and Instrumentation for Atmospheric and Space Research IV*. – 2002. – Vol. 4485. – P. 338 – 348.
28. Holtzworth R.H. Mathematical representation of the auroral oval / R.H. Holtzworth, C.-I. Meng // *Geophys. Res. Lett.* – 1975. – Vol. 2 – N. 9. – P. 377 – 380.
29. Büssov R. An algorithm for continuous Morlet wavelet transform / R. Büssov // *Mechanical systems and signal processing*. – 2007. – Vol. 21. – Iss. 8. – P. 2970 – 2979.
30. Liner Ch. An overview of wavelet transform concepts and applications / Ch. Liner. – Houston: University of Houston, 2010.
31. Germany G. A. Auroral observations from the POLAR Ultraviolet Imager (UVI) / G. A. Germany, J. F. Spann, G.K. Parks [et al.] // *Geospace Mass and Energy Flow: Results the International Solar-terrestrial Physics Program. Geophys. Monogr. Ser.*; edited by J. L. Horwitz, D. L. Gallagher and W. K. Peterson. – D. C. Washington. – Vol. 104. – 1998. – P. 149 – 160.
32. Strickland D. J. Dependence of auroral FUV emissions on the incident electron spectrum and neutral atmosphere / D. J. Strickland, J. R. Jasperse, J. A. Whalen // *Journ. Geophys. Res.* – 1983. – Vol. 88. – N. A10. – P. 8051 – 8062.
33. Kuzmin A. K. Remote optical diagnostics of polar ionosphere condition in different spectral bands based on orbital auroral imaging data. Part 1 (VUV band) / A. K. Kuzmin, A. M. Merzlyi // *Matters of Electromechanics. VNIIEM Proceedings*. – M.: 'VNIIEM Corporation' JC, 2018. – Vol. 167. – No. 6. – Pp. 9 – 41.
34. Mende S. B. The THEMIS array of ground-based observatories for the study of auroral substorms / S. B. Mende, S. E. Harris, H. U. Frey [et al.] // *Space Sci. Rev.* – 2008. – Vol. 141. – P. 357 – 387. – Doi: 10.1007/s11214-008-9380-x.
35. Rees, M. H. Auroral electron energy derived from ratio of spectroscopic emissions 1. Model computations / M.H. Rees, D. Luckey // *Journ. Geophys. Res.* – 1974. – Vol. 79. – N. 34. – P. 5181 – 5186. – Doi: 10.1029/JA079i034p05181.
36. Steel D. P. Electron auroral excitation efficient and intensity ratios / D. P. Steel, D.J. McEwen // *Journ. Geophys. Res.* – 1990. – Vol. 95. – P. 10321 – 10336.
37. Schunk R. Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry / R. Schunk, A. Nagy. – 2nd ed. – Vol. 1. – Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2009. – 628 p.
38. Kuzmin A. K. Auroral emissions, precipitating electrons and ions, and magnetic field gradients as objects of research using small system 'Aurora' of small satellite and local diagnostics of polar ionosphere condition [Electronic resource]: presentation / A. K. Kuzmin, O. L. Vaisberg, A. Iu. Shestakov [et al.] // *Symposium 'Actual issues of development of Russian small satellites and their use for implementation of social and economic tasks, section A*. – Kaluga, 2018. – 27 slides.
39. Vondrak R. R. Remote sensing of high-latitude ionization with the ISIS 2 auroral scanning photometer / R. R. Vondrak, J. S. Murphree, C. D. Anger // *Radio Science*. – 1985. – Vol. 20. – N. 3. – P. 439 – 446.
40. Banshchikova M. A. Application software system 'Vector-M' for calculation of relevant geophysical and astronomical information for observation space in the experiment of Aurovisor-VIS/MP installed on Meteor-MP / M. A. Banshchikova, I. N. Chuvashov, A. K. Kuzmin // *Russian Physics Journal*. – 2012. – No. 10/2. – Pp. 106 – 111.
41. Dashkevich Zh. V. Photometry and modeling of auroral emissions: thesis for a Candidate Degree in Physics and Mathematics: 25.00.29 / Dashkevich Zhanna Vladimirovna. – Apatity: Polar Geophysical Institute of RAS, 2005. – 145 p.

42. Banshchikova M. A. Influence of magnetically conjugate fragments of auroral emission images of the accuracy of determining Eav of precipitating electrons / M. A. Banshchikova, I. N. Chuvashov, A. K. Kuzmin [et al.] // Russian Physics Journal. – 2018. – Vol. 61. – N. 1. – P. 150 – 156. – Doi:10.1007/s 11182018-1378-6.
43. Kozlov B. V. Development of methods of real-time forecasting of small-scale polar ionosphere fluctuations for enhancing the efficiency of navigation and radar systems [Electronic resource] : presentation / B. V. Kozlov, A. K. Kuzmin, P. P. Moiseev // Presentation for the section of the Space Council of the Russian Academy of Sciences. – 2019. – 49 slides.
44. Vaisberg O. L. System of small-size devices for space weather studies / O. L. Vaisberg, A. Iu. Shestakov, S. D. Shuvalov [et al.] // Journal of Instrument Engineering. – 2018. – Vol. 61. – No. 5. – Pp. 399 – 402.
45. Dobrolenskii Iu. S. Study of auroral characteristics and altitude-latitude structure of Earth upper atmosphere and ionosphere emissions using the method of 3D reconstruction of images acquired at the altitude of advanced microsatellite orbit / Iu. S. Dobrolenskii, B. V. Kozlov, A. K. Kuzmin [et al.] // Collected volume. Solar-terrestrial relationship research using micro-, nano- and picosatellites (proceedings of scientific session of the solar-terrestrial relationship section of the Space Council of RAS). – M. : Space Research Institute of RAS, 2015. – Pp. 61 – 76.
46. Obuchi Y. Initial observations of auroras by multi-spectral auroral camera on board the REIMEI satellite / Y. Obuchi, T. Sakanoi, A. Yamazaki [et al.] // Earth Planet Space. – 2008. – Vol. 60. – N 8. – P. 827 – 835.
47. Cogger L. Fast Auroral Imager (FAI) for e-POP Mission / L. Cogger, A. Howarth, A. Yau // Space Sci. Rev. – 2014. – Vol. 189. – P. 15 – 25. – Doi: 10.1007/s11214-014-0107-x.
48. Kuzmin A. K. Characteristics of orbital imager Aurovisor-VIS/MP under development and perspectives of using auroral images for investigation of processes in the polar ionosphere and optical monitoring of inhomogeneity of conditions effecting signal propagation [Electronic resource] / A. K. Kuzmin, M. A. Banshchikova, Iu. S. Dobrolenskii [et al.] // Practical aspects of gelio-geophysics. – M. : Space Research Institute of RAS, 2016. – Pp. 114 – 133. – Available at : <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/201601.pdf>, free access.
49. Avdyushev V. A. Capabilities of software «Vector-M» for a diagnostics of the ionosphere state from auroral emissions images and plasma characteristics from the different orbits as a part of the system of control of space weather [Electronic resource] / Avdyushev V. A., Banshchikova M. A., Chuvashov I. N. [et al.] // European Planetary Science Congress 2017; EPSC2017-834-1. – Tomsk : Tomsk State University, 2017. – Vol. 11. – 2017. – PDF format 2017EPSC.PDF.
50. Kuzmin A. K. Advantages of observations of auroral structures from two orbits and capabilities for reconstruction of 3D emission distributions acquired in different positions of imagers / A. K. Kuzmin, M. A. Banshchikova, I. N. Chuvashov [et al.] // Matters of Electromechanics. VNIIEEM Proceedings. – M. : ‘VNIIEEM Corporation’ JC, 2017. – Vol. 158. – No. 3. – Pp. 7 – 21.

Aleksandr Konstantinovich Kuzmin, Candidate of Physics and Mathematics (Ph. D.), Chief Specialist, tel.: +7 (495) 333-20-00, e-mail: alkuzmin@mail.ru.

Oleg Leonidovich Vaisberg, Doctor of Physics and Mathematics (D. Sc.), Head of Laboratory, tel.: +7 (495) 333-34-56, e-mail: olegv@iki.rssi.ru.

Sergey Dmitrievich Shuvalov, Junior Researcher, tel.: +7 (495) 333-41-88, e-mail: shuvalovsergey@gmail.com. (Space Research Institute of RAS).

Artem Iurevich Shestakov, Junior Researcher, tel.: +7 (495) 333-41-88, e-mail: sartiom1@yandex.ru.

Grigorii Mikhailovich Kruchenitskii, Doctor of Physics and Mathematics (D. Sc.), Head of Department, tel.: +7 (495) 408-61-41, e-mail: omd@cao-rhms.ru. (Central Aerological Observatory of Roshydromet).

Maria Aleksandrovna Banshchikova, Candidate of Physics and Mathematics (Ph. D.), Associate Professor, tel.: +7 (3822) 529-776, e-mail: mba-tomsk@mail.ru.

(Scientific Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University).