

Поступила в редакцию29.09.2021 г.Опубликована22.12.2021 г.

ISSN 2304-7380

УДК 550.388.2; 550.388.8; 551.594.5

### ОСНОВЫ ПЕРСПЕКТИВНОЙ МЕТОДИКИ КОМПЛЕКСНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЛИЯНИЯ АВРОРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЫ НА УСЛОВИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТРАНСПОЛЯРНЫХ СИГНАЛОВ. ОБЗОР ЗАРУБЕЖНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И РЕЗУЛЬТАТЫ НЕКОТОРЫХ МОДЕЛЕЙ

А.К. Кузьмин<sup>1</sup>, А.М. Мерзлый<sup>1</sup>, О.В. Никифоров<sup>1</sup>, А.А.Петрукович<sup>1</sup>, А.М. Садовский<sup>1</sup>, А.А. Позин<sup>2</sup>, Ю.А. Щукин<sup>2</sup>, Ю.Н. Потанин<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ИКИ РАН, г. Москва, Россия <sup>2</sup> НПО Тайфун, г. Обнинск, Россия <sup>3</sup> ЦАО Росгидромет, г. Долгопрудный, Россия

В контексте статьи рассматривается современное состояние исследований характеристик полярной ионосферы. Спектр разнообразия масштабов авроральных структур, которые могут встречаться на пути сигналов в ионосфере, иллюстрируется примерами авроральных изображений и характеристик плазмы, полученных с разных орбит КА, с поверхности Земли и зондирующих ракет. Рассматриваются конкретные примеры результатов орбитальных, ракетных и наземных измерений характеристик полярной ионосферы, сопровождающих генерацию неоднородностей электронной концентрации и сцинтилляции трансполярных сигналов, полученные конкретными авторами и группами различных лабораторий в полярных областях ионосферы в различных электродинамических условиях. Анализируются некоторые результаты современных моделей генерации неоднородностей в каспе и полярной шапке, как причин сцинтилляций распространяющихся сигналов. Вопрос: «почему генерация сцинтилляций сигналов GNSS возникает при «протыкании» ими одних авроральных структур и не возникает при «протыкании» других?» – остаётся. Ответ на него, наиболее вероятно, связан с условиями генерации и развития плазменных неустойчивостей, приводящих к образованию структур плазменных неоднородностей с масштабом от нескольких сантиметров до нескольких десятков километров разных масштабов в разных слоях ионосферы, разных секторах MLT полярной ионосферы, и разных условиях ММП. Как, с помощью каких средств диагностики и с помощью каких моделей, в каких конкретных наборах условий необходимо получать и анализировать информацию о состоянии локальных областей среды – это задача, решение которой позволит в будущем научиться предсказывать условия распространения трансполярных сигналов. Поэтому для перспективных исследований необходима методическая основа развития технологий постановки экспериментов, нацеленных как на глобальные, так и на локальные комплексные наблюдения авроральных структур, продольных и замыкающих токов, характеристик неоднородностей в плазме в разных слоях ионосферы, и их влияния на условия распространения волн на частотах, используемых орбитальными навигационными и другими системами.

Авторы просят с пониманием отнестись, что в статье часто используются как русские, так и английские названия и терминология, т.к. их перевод на русский язык не всегда точен.

Ключевые слова: полярная ионосфера, неоднородности, авроральные эмиссии, орбитальная диагностика, контроль состояния характеристик, космическая погода, условия распространения трансполярных сигналов, моделирование неоднородностей ионосферы и сцинтилляций

**DOI:** 10.54252/2304-7380\_2021\_32\_3

ФГБУ «ИПГ» 129128; Россия, Москва ул. Ростокинская, 9.

Электронная почта авторов для переписки:

Кузьмин Александр Константинович, e-mail: alkkuzmin@mail.ru Мерзлый Алексей Михайлович, e-mail: pinega142@yandex.ru Никифоров Олег Вячеславович, e-mail: gelokin2201@gmail.com Петрукович Анатолий Алексеевич, e-mail: apetruko@iki.rssi.ru Садовский Андрей Михайлович, e-mail: asadovsk@iki.rssi.ru Позин Анатолий Александрович, e-mail: pozin@rpaty.phoo.ru Щукин Юрий Александрович, e-mail: schukin@rpaty.phoo.ru Потанин Юрий Николаевич, e-mail: oom@cao-rhms.ru

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Прошло более 60 лет как исследования характеристик электродинамики полярной ионосферы и их связи с магнитосферными процессами проводятся различными научными группами и коллективами лабораторий с использованием различных экспериментальных и модельных методик, но только в последнее десятилетие их развитие позволило приблизиться к наблюдениям авроральных структур и процессов, происходящих на масштабах близких к километру. Одним из важнейших стимулов этого развития послужила все более нарастающая востребованность регулярного контроля характеристик, анализа их мгновенного состояния, моделирования процессов, и их краткосрочного прогнозирования в локальных секторах полярной ионосферы в интересах принятия оперативных решений о выборе режимов наиболее надежного функционирования систем, «использующих» ионосферу как среду распространения сигналов орбитальной связи, навигации, радиолокации [Hunsuker and Hargreaves, 2003]. Попытка построения функциональной блок-схемы перспективной системы контроля и оценки состояния фактической фоновой спектральной и электродинамической обстановки в полярной ионосфере по спектральным изображениям конкретных авроральных эмиссий на разных высотах была сделана в [Кузьмин и др., 2019-2].

В высоких широтах в различных конкретных условиях космической погоды в результате динамичных событий взаимодействия солнечного ветра, магнитосферы, ионосферы и термосферы, энергии высыпающихся заряженных частиц на высотах ~100-500 км, и крупномасштабной конвекции плазмы возникают процессы, приводящие к генерации плазменных неустойчивостей и образованию локальных областей с градиентами электронной концентрации  $\delta N_{\rm e}$ , отображающихся в эмиссиях конкретных диффузных, дискретных и динамичных авроральных структур, список совокупностей которых все продолжает увеличиваться по мере улучшения пространственного и временного разрешения аппаратуры, а также развития методик наблюдений. Процессы в дальней и ближней магнитосфере и крупномасштабная конвекция плазмы в высокоширотной ионосфере порождают различные типы неустойчивостей в плазме в зависимости от условий в солнечном ветре, знаков компонент ММП, конкретного местоположения в авроральном овале, каспе или полярной шапке, а также от геомагнитных условий, высыпаний заряженных частиц и генерации продольных токов, кинетической температуры нейтралов и ионов, массовой скорости переноса нейтралов и дрейфа ионов (например, [Basu et al., 1994; Keskinen and Ossakow, 1983; Wang et al., 2016]). В конечном счете, процессы развития плазменных неустойчивостей или их последовательностей и локальные высыпания электронов и протонов приводят к градиентам  $\delta N_e$  на разных высотах в разных секторах полярной ионосферы и образованию структур неоднородностей ионосферы с размерами от нескольких сантиметров до нескольких десятков километров [Deshpande and Zettergren, 2019]. Как уже сказано, все неоднородности так или иначе отображаются в разнообразных формах авроральных эмиссий, излучаемых возбужденными молекулярными и атомарными нейтралами и ионами на высотах Е-и Fслоя.

Неоднородности Ne – препятствия на пути распространения трансполярных сигналов в ионосфере в частотном диапазоне десятков-сотен МГц, и, в конечном счете, именно они являются причиной колебаний (флуктуаций) сигналов, их фазы и амплитуды, временных задержек, нарушений структуры, а иногда и кратковременных пропаданий сигнала, называемых потерями захвата частоты «loss of lock», приводящих к увеличению ошибок в навигации и уменьшению достоверности измерений, проводимых радиолокационными системами [Oksavik et al.,2015]. Как природные, так и искусственно созданные неоднородности размером от нескольких десятков метров до нескольких км, появляющиеся на пути радиосигналов вызывают флуктуации радиосигналов, которые нарушают целостность их структуры, например, глобальных орбитальных навигационных систем. Флуктуации фазы и амплитуды радиосигнала, когда они достаточно интенсивны, называют ионосферными сцинтилляциями или мерцаниями. Термин «сцинтилляции» относится к быстрым амплитудным и фазовым колебаниям в принимаемой электромагнитной волне, прошедших сквозь неоднородности. Для иллюстрации на рис.1, адаптированном из [Deshpande et al., 2016], показано шесть параллельных во времени разверток фазы сигналов GPS  $\sigma_{\phi}$ , полученных одновременно в условиях начала одной из серий магнитных бурь ( $K_p \cong 5 \div 6$ ) произошедших 3 сентября 2012 г. Они получены с частотой 50 Гц в течение одного конкретного часа (03-04 UT) с шести станций в разных точках полярных широт и долгот, координаты которых приведены в табл.1. Развертка на станции ResoluteBay будет использована далее (см. рис.15d внизу) для сравнения временной развертки фазы сигнала GPS, наблюдавшейся на станции Resolute Bay (зеленый) и смоделированной фазы (в Рад) (синий) от времени (в сек) с модельными расчетами. Второй пример будет рассмотрен на рис. 9 и 10 в п.4.2.1.А., иллюстрирующих измерения сцинтилляций 03.11.2016 г. одновременно тремя орбитальными GNSS системами (GPS, GLONASS и Galileo). Они были проведены в области каспа и полярной шапки со станций, находящихся примерно на расстоянии ~100 км друг от друга на о. Шпицберген.

Разнообразие масштабов природных авроральных структур велико (см. рисунки 3, 6, 7 а также серию работ: [Maggs and Davis; Henderson et al., 2018; Zhang et al., 2021-1, 1993; Galperin, 2002; Sandahl et al., 2011; Dahlgren, 2011; Dahlgren et al., 2012; Karlsson et al., 2020; Hosokawa et al., 2020]. Аврора может появляться в различных условиях, в различных секторах аврорального овала, в каспе и полярной шапке, развиваться, изменять форму, структуру и интенсивность, дрейфовать (заряженные компоненты) в скрещенных полях  $\vec{E} \times \vec{B}$  в зависимости от условий ММП и мгновенного электродинамического состояния системы магнитосфера-ионосфера-термосфера (M-I-T) в целом [Wang et al., 2016]. Поэтому при измерениях характеристик полярной ионосферы важен учет столкновений ионов с нейтралами, массово двигающимися по закону термодинамики. Распределения интенсивности авроральных эмиссий отображают 3D-структуры возбужденных ионизованных и нейтральных составляющих и распределения энергетических характеристик высыпающихся частиц, и **поэтому** их регулярные измерения так необходимы как в глобальном, так и в локальных масштабах [Кузьмин и Мерзлый, 2014,2018,2019-1,2019-2] для исследований причинно-следственных связей при генерации сцинтилляций.

До сих пор однозначно не классифицировано и детально не исследовано, какие, в каких секторах MLT, в каких высотных слоях и в каких условиях ионосферные процессы вызывают неоднородности, приводящие к сцинтилляциям сигналов в полярной ионосфере. Последнее десятилетие объектом внимания стали эмиссионные пятна и блобы (сгустки) Ne полярной шапки, и дуги полярной шапки, вытянутые в направлении от Солнца, являющиеся «проводниками», вдоль которых сгустки конвектируют в сторону ночной стороны полярной кромки аврорального овала. В работе [Zhang et al., 2016] построена логичная концепция, что направление вытянутости дуг полярной шапки начинается от каспа. Именно эти неоднородности, попадающие под высыпания заряженных частиц в авроральном овале, являются источниками значительных фазовых сцинтилляций, и поэтому стали целью исследований в ряду работ, например, [Van der Meerin et al., 2015, Hosokawa et al., 2019] (см. далее).

Наряду с природными структурами свечения эмиссий в плазме околоземной полярной ионосферы могут присутствовать и наблюдаться мелкомасштабные градиенты  $\delta N_{\rm e}$  и структуры свечения (см. Fig.1 в [Cragin et al., 1977], созданные искусственно при воздействии на ионосферу модулированными ВЧ-волнами, генерируемыми мощными наземными нагревными стендами. Один из первых экспериментов в этом направлении был проведен в 1984 г. в Ramjordmoen (69.6° N. 19.2° Е geographic) вблизи Tromso, Norway на частоте 250 МГц с целью модификации F-области ионосферы в дневное время. Узкополосные спектральные усиления, соответствующие масштабу неоднородности 750 м были обнаружены в спектрах интенсивности, когда излучаемая ВЧ мощность достигала расчетной, плотность была около 0,3 мВт/м на высоте отражения. Порог плотности мощности, необходимый для генерации наблюдаемых размеров масштабов неоднородностей, рассчитывался из теории самофокусирующейся неустойчивости плазмы [Cragin et al., 1977] с использованием параметров ионосферного фона, измеряемого радаром EISCAT. В первой декаде 21 века были проведены эксперименты на ВЧ-стенде в Гаконе (Аляска), в которых в конкретных режимах были сгенерированы множества мелких неоднородностей в ионосфере, названных плазмоидами, проявляющихся в мелкомасштабных (<1 км) лучистых структурах свечения, видимых с наземной станции как пятнышки эмиссий [Kendall et al., 2010]. Эти результаты были рассмотрены в нашем обзоре [Кузьмин и др., 2016]. Другие способы искусственного создания неоднородностей плазмы в полярной ионосфере были рассмотрены в [Knepp and Witter, 1984, Knepp, 2015; Grimault, 1998]. Все эти структуры неоднородностей ионосферной плазмы потенциально могут быть препятствиями на пути распространения трансполярных сигналов навигационных и других систем, и могут диагностироваться с поверхности Земли и низковысотных полярных орбит с помощью имаджеров авроральных эмиссий с пространственным разрешением  $\sim 1 \times 1 \text{ км/пиксель}$  и временным  $\sim 0.1 \text{ с таких}$ как MAC на КА REIMEI и FAI на КА e-POP [Obuchi et al., 2008; Cogger et al., 2014], а также перспективных [Кузьмин и др., 2016, 2019-1].



Таблица 1. (слева вверху Рис.1). Список шести наземных станций приема GPS сигналов, их координаты (географические и геомагнитные).

Рис. 1. Развертки фазовых сцинтилляций сигналов, принятых с конкретных спутников GPS в интервале 03-04 UT, 9 марта 2012 г. Справа внизу развертка условий в солнечном ветре по данным OMNI, и AE-индекса с 8 по 10 марта 2012 г., интервал 03-04 UT помечен вертикальной сплошной линией.

6

Еще в 2007 г. [Кintner et al., 2007] обратили внимание, что пространственные и временные распределения характеристик сцинтилляций и свечений авроральных эмиссий могут использоваться для исследований процессов, приводящих к возникновению неоднородностей Ne в полярной ионосфере. Поэтому с ростом активности человека в полярных областях и, особенно в Арктике прогресс в выявлении и понимании физических механизмов, которые приводят к генерации неоднородностей в плазме ионосферы, приобретает все большее научное и практическое значение, и стимулирует дальнейшие исследования. Попытка построения основ методики выяснения причинно-следственных связей условий генерации неоднородностей полярной ионосферы и сцинтилляций трансполярных сигналов стала главной мотивацией подготовки данной статьи.

Как уже было сказано, сцинтилляции трансионосферных сигналов в полярных областях происходят при пересечении ими градиентов электронной плотности вдоль участка пути распространения. Физической причиной сцинтилляций является интерференция преломленных и/или дифрагированных (рассеянных) волн из-за многих изменений в показателе преломления среды [Yeh and Liu, 1982; Kintner et al., 2007; Tsunoda, 1988]. Падающая плоская или сферическая волна входит в такую среду с пространственно-однородной фазой и выходит из среды с пространственнонеоднородной фазовой скоростью. Одномерная иллюстрация приближения тонкого экрана с неоднородностями в полярной ионосфере, вызывающая дифракционные помехи и изменяющего фазу распространяющейся радиоволны, условно показана на рис. 2. Сигнал, идущий от спутника GPS к приемнику через экран неоднородностей в авроральной структуре, созданной высыпаниями электронов, изменяет фазу и амплитуду. Используя принцип Гюйгенса, сигнал представлен плоским волновым фронтом, состоящим из множества точечных источников вторичных вейвлетов. Поскольку волна распространяется через экран, включающий неоднородности  $\delta N_{\rm e}$ , ее фаза подвержена случайным колебаниям показателя преломления, зависящим от размера и распределения плотности неоднородностей электронов в экране. В течение распространения до приемника неоднородные по фазе сигналы могут либо увеличиваться, либо гаситься, т.е. изменяться по амплитуде. Плоская волна остается плоской, но фаза меняется по мере изменения ее интегрального сдвига. После выхода из слоя неоднородности фазовый фронт сигнала модулируется случайным образом. Далее индуцированные фазовые возмущения эволюционируют по мере распространения волны (эффект на рис. 2 преувеличен). В конечном итоге на приемной антенне создается поле помех, а результирующий эффект от конструктивного и деструктивного сигналов суммируется вдоль фронта волны от виртуальных точечных источников с разной фазой. Более плотная плазма может «производить» сцинтилляции на более высоких частотах, более неоднородная плазма – более сильные амплитудные сцинтилляции. Временной процесс развития дифракционных сцинтилляций зависит от длины  $d_F$  Френеля (Fresnel), скорости дрейфа структур ионосферы в скрещенных полях **Е**×**B** и относительных скоростей КА систем навигации и их приемников.

Рисунок 1 (из [Deshpande et al., 2016]) иллюстрирует временное распределение величины фазовых сцинтилляций одновременно на шести станциях, расположенных в северной и южной полярных зонах (их географические и геомагнитные координаты даны в табл. 1). На одной временной шкале показаны развертки фазы сигнала конкретных КА GPS PRN (в радианах) в шести разных точках (в зависимости от геомагнитной широты), полученные 3 сентября 2012 г. в условиях геомагнитной бури в течение одного часа с 03 UT до 04 UT (в этом интервале планетарный К-индекс изменялся от 5 до 6). Вертикальная шкала справа (соответствует фазе 3 rad) иллюстрирует интенсивность фазовых сцинтилляций. Справа показана развертка условий в солнечном ветре, ММП, и АЕ-индекс в период с 8 по 10 марта 2012 г. Период 03-04 UT выделен вертикальной серой чертой. Правая нижняя панель: условия в солнечном ветре, ММП, и АЕ-индекс в интервале 03-04 UT 03.09.2012 (адаптирована из [Prikryl et al., 2015]). Правая верхняя панель: карта скорости конвекции, полученная с использованием методики, описанной [Ruohoniemi and Baker, 1998], по данным сети SuperDARN в северной высокоширотной области в 3:30 UT 9 марта 2012 г. Цветные мелкие векторы скорости конвекции (м/сек) отображают величины с помощью цветовой шкалы, включая область расположения станций Resolute Bay и Tromso. Средняя верхняя панель – поток энергии высыпающихся частиц в области северного аврорального овала по модели OVATION Prime model на 03-04 UT.



Рис. 2. (Одномерная иллюстрация (не в масштабе) приближения распространения трансполярного сигнала от навигационного спутника к приемнику через «экран» неоднородностей δN<sub>e</sub> в авроральной структуре полярной ионосферы, вызывающих нарушения структуры в распространяющейся плоской радиоволне

Вектор В показывает направление силовой линии магнитного поля. Неоднородности вытянуты (приблизительно) вдоль В. Вверху слева встроен рисунок координатной системы распространения волны от передатчика к приемнику через плоский экран с неоднородностями адаптированный из [Kintner et al., 2007] (см. далее). Подразумевается, что неоднородности появились благодаря высыпаниям электронов, возбуждающих авроральную структуру. Внизу (условно) показаны: радар некогерентного обратного рассеяния, используемый для определения электронной плотности на различных высотах вдоль пути распространения сигнала, All-sky камера для широкоугольных наблюдений интенсивности эмиссий авроральных структур, и приемник одной из навигационной систем GLONASS/GPS/Galileo.

### 2. КРАТКИЙ ЭКСКУРС В ТЕОРИЮ СЦИНТИЛЛЯЦИЙ

Неоднородности электронной концентрации искажают исходный волновой фронт, вызывая случайную фазовую модуляцию волны  $k_0(\Delta \varphi)$  [Wernik et al., 2004], где для радиоволны длиной  $\lambda$ ,  $k_0 = 2\pi/\lambda$ - волновое число в свободном пространстве, а  $\Delta \varphi$ - вариация длины оптического пути внутри слоя с неоднородностями.  $\Delta \varphi$  зависит от флуктуаций полного электронного содержания в ионосфере  $\Delta N_{\rm T}$ , вызванных неоднородностями, где  $N_T = \int N_e dr$ - полное электронное содержание вдоль вектора  $\vec{r}$  (см. рис. 2):

<sup>©</sup> Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

$$\Delta \varphi = -\frac{2\pi r_e \Delta N_T}{k_0^2},\tag{1}$$

где *r*<sub>e</sub> – классический радиус электрона.

По мере распространения волны к приемнику происходит фазовое смешивание, изменяющее модуляцию волны и, в конечном счете, создающее сложную дифракционную картину на Земле. Флуктуации амплитуды вызваны в основном неоднородностями размером порядка первой зоны Френеля  $d_F = \sqrt{\lambda(z - L/2)}$ , где z – высота верхней границы неоднородного слоя (экрана), а L-толщина слоя. Этот сценарий генерации сцинтилляций действителен при условии, что  $\Delta \varphi$  относительно не велико. Если флуктуации электронной плотности значительны, то флуктуации фазы могут быть большими, а когда достигают определенного предельного значения, волны становятся некогерентными и интерференция лучей становится невозможной.

Теория сцинтилляций связывает статистику наблюдаемых сигналов со статистикой флуктуаций электронной плотности ионосферы (см. обзоры: [Yeh and Liu, 1982; Bhattacharyya et al., 1992; Yeh and Wernik, 1993; Basu et al., 2002]). Общая задача о распространении волн в случайной среде трудно поддается численному решению. Однако она упрощается, если длина волны намного меньше характерного масштаба неоднородностей. В этом случае волна рассеивается преимущественно в прямом направлении, а ее распространение описывается параболическим уравнением, которое решено рядом авторов см., например, [Tatarskii, 1971; Tatarskii et al., 1993]. Дальнейшие упрощения возможны, если слой неправильной формы настолько тонкий, что  $\sqrt{\lambda L}$  намного меньше размера наибольшей неоднородности, вносящей вклад в сцинтилляцию. Это предположение привело к так называемой теории сцинтилляции фазового экрана, в которой неоднородный слой заменяется экраном, который изменяет только фазу волны. Экран расположен в ионосфере на высоте максимальной электронной плотности. Исторически модель фазового экрана была первой моделью сцинтилляции [Booker et al., 1950; Hewish, 1951; Ratcliffe, 1954; Lee, 1977]. Более поздние развития моделей [Yeh and Liu 1982; Huba, 1989; Rino, 2011] включали геометрию распространения, анизотропию неоднородностей и случаи как слабого, так и сильного рассеяния. [Кперр and Witwer, 1984; Grimault, 1998; Knepp, 2015] представили модель многофазного экрана, которая позволяет анализировать распространение волн через толстый нерегулярный слой с произвольным профилем фоновой плотности электронов. Дальнейшее развитие теории привело к 3-х мерным моделям сцинтилляций [Basu et al., 2002; Rino, 2011; Chartier et al., 2016], и развитию глобальной модели верхней атмосферы с ионосферными сцинтилляциями [Deshpande and Zettergren, 2019] (см. далее). Для примера в табл. 2 для высот F и E слоя ионосферы показаны примерные размеры Френелевского радиуса (см. (1)) для трех частот, используемых навигационной системой GPS, и временной масштаб структур  $\tau \sim r_F/v$ , движущихся на высоте 350 км со скоростью дрейфа v~1 км/сек [Loucks et al., 2017].

Таблица 2. Размер Френелевского ради	іуса $r_F$ (на высотах $3$	350 и 135 км) и вр	еменной масштаб в	при скорости v=1
км/с для трех частот GPS: L1, L2, L5 (с	м. текст).			

U.S. Global Po	sitioning System (G	PS) Parameters	Fresnel Ra	adius <i>r<sub>F</sub></i> (m)	Time Scale	
Carrier Label Frequency (MH:		Codes	H=350 km	H=135 km	$\tau \sim r_F/v$ 350 km (s)	
L1	1575.42	C/A and P(Y)	~365	~227	0.365	
L2	1227.60	C and P(Y)	~413	~257	0.413	
L5	1176.45	LC	~422	~262	0.422	

Adapted from Loucks et al., 2017

Так как сцинтилляции сигнала навигационной системы (например, GPS) случаются, когда радиоволна проходит сквозь неоднородную плазменную среду, то для ее описания используется индекс преломления n = c/v, где с – скорость света в вакууме, а v – скорость света в среде, и уменьшается до 1 в среде близкой к вакууму. В полярной ионосфере n варьирует от электронной плотности Ne и обратно пропорционален квадрату частоты трансмиссии f. Более высокочастотные сигналы, пересекающие ту же ионосферу, будут испытывать преломления с индексом близким к 1 [Knipp, 2011; Schunk and Nagy, 2009]. Сцинтилляция радиоволн в форме внезапных изменений фазы сигнала и/или амплитуды вызывается явлениями волновой дифракции и рефракции. В результате дифракции волна огибает объект или среду, в то время как рефракция происходит, когда волновой

изгиб проходит сквозь среду. В случае дифракции наблюдаются сцинтилляции как фазы, так и амплитуды сигнала [Kintner et al., 2007]. В случае преломления в основном наблюдаются фазовые сцинтилляции. В высоких широтах, только фазовая сцинтилляция статистически значима, хотя амплитудная сцинтилляция также случается [Spogli et al., 2009; Kintner et al., 2007].

Величина, описывающая дифракцию и рефракцию, это Френелевский (Fresnel) радиус ( $r_F$ ). Обычно он рассматривается для антенн, которые разделены на некоторое расстояние на Земле. Для сигналов с КА он связан с расстоянием r от интерферирующей ионосферной структуры до приемника (рис. 2 слева вверху [Kintner et al., 2007]). Френелевский радиус дается в (2).

$$r_F = \sqrt{2\lambda r} \tag{2}$$

Эффекты дифракции видны, когда ионосферная структура по пути волны имеет размер порядка или меньше, чем  $r_F$ . Преломляющие эффекты случаются, когда размер ионосферных структур много больше, чем  $r_F$  [Kintner et al., 2007]. Таблица 2 включает примерные значения  $r_F$  для трех частот L1, L2, L5 GPS. Они рассчитаны в [Loucks et al., 2017], с предположением высоты F-слоя 350 км и высоты Eслоя 135 км, обычно используемых для расчета точек протыкания (ionospheric pierce point IPP), в предположении, что высота неоднородностей ионосферы, влияющих на величину сцинтилляций GPS сигналов находится или вблизи максимума F-области или вблизи максимума E-слоя [Kaplan and Hegarty, 2006]. Заметим, что Френелевские радиусы для высоты Е-области 135 км на ~40% меньше, чем в F-области. Эта высоты были выбраны из-за их близости к максимумам электронной плотности электронов, наблюдаемых с наибольшими сцинтилляциями в [Loucks et al, 2017]. Высоты, ассоциированные с плазменными пятнами, которые позже становятся авроральными сгустками (blobes) охватывают F-область ионосферы ~250-500 км [Crowley et al., 2000; Hosokawa et al., 2016]. Примеры в табл. 2 демонстрируют диапазон минимальных размеров r<sub>F</sub> на высотах порядка 350 и 135 км, движущихся со скоростью ~1 км/с. Радиусы рассчитываются из  $\tau \sim r_F/v$ , где v – дрейфовая скорость структуры. Градиенты электронной плотности, являющиеся результатом от движущихся и/или изменяющихся структур в высокоширотной ионосфере, - причина переменности индекса преломления вдоль пути сигнала, и источник изменений амплитуды и/или фазы сигнала от спутника к приемникам на Земле. Результаты многих исследований показывают, что фазовые сцинтилляции, как правило, вызываются неоднородностями на масштабах от сотен метров до нескольких километров. В то время как амплитудные сцинтилляции обычно вызываются неоднородностями в меньших масштабах от сотен метров до десятков метров, что подтверждается наблюдениями и моделированием (например, Moen et al., 2013; van der Meeren et al., 2014,2015; Wang et al., 2016, 2018).

В недавней экспериментальной работе [Wang et al., 2018] было рассмотрено существенное влияние скорости дрейфа ионосферной плазмы на величину индекса фазовых сцинтилляций ( $\sigma_{\phi}$ ) в F-области в окрестности каспа во время мощных суббурь. Авторы этой работы считают, что эту зависимость можно исправлять с помощью более динамичного выбора частот среза при устранении тренда данных GPS с использованием одновременных и координированных измерений дрейфа плазмы. Более того, эта зависимость может также объяснить более частое появление фазовых сцинтилляций в области высоких широт по сравнению с амплитудными сцинтилляциями и так называемым явлением сцинтилляций «фаза без амплитуды». Более подробные обсуждения вопросов теории сцинтилляций можно найти в [Aarons, 2000; Kintner et al., 2007; Knipp, 2011; Schunk and Nagy, 2009; Yeh and Liu, 1982; Tsunoda, 1988].

### 3. ИНДЕКСЫ СЦИНТИЛЛЯЦИЙ

Флуктуации амплитуды и фазы регистрируемого сигнала статистически характеризуются двумя основными параметрами, амплитудный и фазовый индексы сцинтилляций, обозначенные соответственно  $S_4$  и  $\sigma_{\phi}$  [Van der Meerin et al., 2015]. Индекс сцинтилляций амплитуды количественно оценивается безразмерным индексом S<sub>4</sub>, который представляет собой стандартное отклонение принятой интенсивности, нормированное на его среднее значение за конкретный интервал времени (3).

$$S_4^2 = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2} \tag{3}$$

<sup>©</sup> Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

Интервал времени, в течение которого вычисляется этот параметр, зависит от периода, в течение которого наблюдаются стационарные колебания сигнала. Для орбитальных (негеостационарных) КА с полярным наклонением плоскости орбиты используется сегмент данных от 10 до 30 секунд.

Фазовые сцинтилляции вызываются неоднородностями масштаба от нескольких сотен метров до нескольких километров [Kintner et al., 2007] и количественно оцениваются индексом  $\sigma_{\phi}$ , который представляет собой стандартное отклонение фазы несущей (с удаленным трендом в сегменте данных) в радианах за некоторый период времени [Fremouw et al., 1985]. Линейное снижение тренда в соответствующем сегменте данных устраняет фоновое изменение фазы, вызванное плавными изменениями плотности ионизации. Устранение тренда обычно выполняется с использованием фильтра Баттерворта шестого порядка с частотой среза 0,1 Гц [см., например, Kinrade et al., 2013; Jin et al., 2014].

Индекс фазовых сцинтилляций определяется в (4)

$$\sigma_{\Phi}^2 = \langle \phi^2 \rangle - \langle \phi \rangle^2 \tag{4}$$

### 4. КОРРЕЛЯЦИИ СЦИНТИЛЛЯЦИЙ РАДИОСИГНАЛОВ ОРБИТАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ С ВЫСЫПАНИЯМИ ЧАСТИЦ И АВРОРАЛЬНЫМИ СТРУКТУРАМИ В РАЗЛИЧНЫХ СЕКТОРАХ ПОЛЯРНОЙ ЗОНЫ

Корреляции сцинтилляций амплитудных и фазовых сцинтилляций GPS сигналов, пересекающих авроральные структуры, наблюдавшиеся в основном наземной изображающей аппаратурой, установленной в Арктической зоне и в Антарктике, рассматривались во множестве исследовательских работ, проведенных как в Е-области, так и в F-области, см. ряд обзорных статей [Кузьмин и др., 2018,2019-1,2019-2]. Поэтому в данной работе будут рассмотрены только относительно новые результаты. Теоретические аспекты сцинтилляций в F-области ионосферы см. [Tsunoda,1988; Basu et al., 2002].

В последнее десятилетие стало ясно, что картина крупномасштабной конвекции в полярных областях ионосферы, управляемая компонентами ММП, включает мезомасштабные структуры, встроенные в более медленно движущийся «фон», и движение сгустков плазмы и пятен тесно связано с ними [Zou et al., 2015; Wang et al. 2016; Lyons et al. 2016; Nishimura et al., 2020].

### 4.1 Разнообразие морфологии и динамики природных авроральных структур, отображающих неоднородности Ne

Авроральные структуры разных масштабов отображают масштабы неоднородностей  $N_{\rm e.}$ , встречающихся в полярной ионосфере. Основными природными источниками возбуждения авроральных эмиссий являются высыпания заряженных частиц и волны различных частот [Mauk and Bagenal, 2012].

Эта тема обширна и достойна отдельной работы. В связи с увеличением чувствительности и пространственного разрешения изображающих детекторов в последнее десятилетие стал увеличиваться список, мезо- и мелкомасштабных авроральных структур, наблюдаемых как с поверхности Земли, так и с низких орбит (частично он схематично отражен на рисунках 4 и 5, и табл. 3). Одна из структур (авроральные стриммеры) показана явно на рис. 3 на изображениях (глобальном и локальном), полученных с орбит КА Polar и DMSPF14 соответственно. Иллюстрация динамики вертикальной структуры высотных распределений неоднородностей *N*<sub>e</sub>, полученных 11 ноября 1981 г. в субполярной и полярной областях с помощью радара в Chatanika (Аляска) см. на рис.20 [Tsunoda, 1988].

### 4.1.1 Глобальный и мезо- масштабы

Уже по результатам наземных наблюдений МГГ (1957–1958 гг.) в основном стало понятно, что авроральные явления концентрируются в северной и южной полярных и околополярных зонах, которые условно было принято называть авроральными овалами и полярными шапками, их анализ отражен в [Хорошева, 2007; Старков, 2000; Фельдштейн и др., 2010]. Первые концепции нашли отражение в фундаментальной монографии по физике полярных сияний [Chamberlain, 1961], а

варианты развития концепций динамики развития авроральных суббурь – в [Akasofu, 2004]. С развитием космической эры на орбитах типа Молния были осуществлены ряд проектов (Kiokko, DE-A, Viking, Polar, Image), по результатам которых были подтверждены концепции аврорального овала и динамики авроральных суббурь [Frey et al., 2003,2007]. Глобальные наблюдения в ВУФ- и видимом диапазонах спектра (Frank and Sigwarth, 2000) не только показали возможность контроля состояния крупномасштабной морфологии и динамики авроры в различных условиях в солнечном ветре, ММП, и геомагнитной активности, но и выявили ряд крупномасштабных авроральных структур в «начинке» овала полярных сияний. Технология проведения ВУФ-наблюдений авроральных структур, и множество примеров результатов были представлены в [Torr et al., 1995; Frank and Sigwarth, 2000; Mende et al., 2000; Frey et al., 2003,2009,] (см., например, Fig.11 в [Frey et al., 2003] и рисунки 4,6,7 в обзоре [Kyзьмин и Мерзлый, 2018]) и рисунки 2 и 3 в [Kyзьмин и Мерзлый, 2019-1]. Динамика развития суббурь на макроскопических масштабах исследовалась и в много-спутниковом проекте THEMIS с активной поддержкой наземных наблюдений, когда в полярных областях Канады и Аляски работало одновременно несколько десятков изображающих камер всего неба (см. рис. 22) [Donovan et al., 2006].

Почти параллельно с глобальными измерениями в полярных областях значительный вклад в физику плазмы полярной ионосферы был внесен результатами, полученными с полярных орбит на «промежуточных» высотах с КА DE-B, FREJA, и особенно FAST, которые позволили исследовать процесс Альфвеновского ускорения заряженных частиц в ближней магнитосфере и ионосфере [Chaston et al., 2000,2003]. Развитие методик наблюдений характеристик полярной ионосферы на масштабах (до 10 км) с орбит на высотах от 500 до 2000 км происходило в течение ряда лет в проектах, включая КА ISIS, AE, Freya, Ореол-3, ИК-Болгария-1300, HILAT, ТІМЕD и особенно КА серии DMSP позволило получить множество снимков различных структур, энергетических распределений высыпающихся в полярную ионосферу заряженных частиц, и результатов по локальной динамике развития суббурь в локальных секторах аврорального овала. Для того чтобы проиллюстрировать разницу в пространственном разрешении при наблюдении аврорального овала с высоты ~40000 км высокоапогейной орбиты КА POLAR (разрешение ~150х150 км/пиксель) и с высоты ~830 км КА DMSP F14 (разрешение ~4–5 км/пиксель) на рис. 3 (адаптирован из Fig.4 в [Henderson et al., 2018]) показан пример глобального ВУФ-изображения (λ130,4 nm) аврорального овала, полученного 09.11.1998 в 10.23.11 UT с помощью ВУФ-канала камеры VIS с орбиты КА Polar [Frank and Sigwarth, 2000], и изображения локального участка аврорального овала, полученного почти одновременно (в 10.23 UT) с помощью фототелевизионной системы OLS (в спектральном диапазоне ~λλ500÷900 nm) с орбиты КА DMSPF14 [Henderson et al., 2018]. На снимке, полученном OLS, видны несколько авроральных стримеров, названных волнистостями (undulations), вытянутых в направлении близком к направлению север-юг на экваториальной кромке аврорального овала во время суббури. Роль этих волноподобных авроральных структур (стримеров) позднее активно изучалась в процессах развития балонной неустойчивости при развитии суббурь [Yao et al., 2017]. Результаты современных исследований. Все последние новости в исследовании характеристик стримеров, вытянутых в направлениях близких к направлению север-юг и условий их возникновения см. в [McPherron et al., 2020].

Так как структуры полярных сияний имеют множества форм, значительная часть которых специфичны, чтобы однозначно определить механизмы генерации и их конкретные локации, перечисление всех их в данной работе не имеет смысла. Многие из них рассмотрены в [Hosokawa et al., 2019; Hosokawa et al., 2020; Lyons et al., 2016; Frey, 2007; Zhang и др., 2016 и др.]. На рисунке 4 представлены схематичные примеры встречающихся типов авроральных структур, а на рис. 5 - их преимущественные локации и направления конвекции, например, мезомасштабная пятнообразная структура высокоширотной освещенной авроры HiILDA (High Latitude Dayside Aurora), показанная под номером 6 на правом рис. 4 [Frey et al., 2007]. HiLDA появляется в условиях низкой плотности солнечного ветра и ММП с положительной Вz, положительной By (часовой угол близкий к 70°), и отрицательной компонентой Вх. Такие условия ММП благоприятны для пересоединения в долях (lobe) хвоста магнитосферы (Северного полушария) и создания доминирующей сумеречной конвективной ячейки направленного вверх тока в ее центре [Cai et al., 2021].

<sup>©</sup> Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова



Рис. 3. Изображение аврорального овала, полученное 09-11-1998 в 10.23.11 UT с помощью ВУФ-канала (λ130,4 нм) изображающей системы VIS, установленной на спиново вращающемся КА Polar. Наложено (в масштабе) изображение участка аврорального овала над Якутией, полученное 09-11-1998 в 10.23 UT с помощью фототелевизионной системы OLS с орбиты KA DMSPF14. Гигантские «волнистости» (undulations) стримеры. Справа показаны: компоненты ММП, скорость и концентрация солнечного ветра, AU, AL, Кр – индексы. Слева внизу показана схема динамики ионосферы при развитии стримеров.



Adapted from Fig (at p.34 in Geophys.Inst.Biennal Rep.1993-1994)

Adapted from Fig.3 in [Frey, 2007]. Number 1-10 see in Tab.

Рис. 4. Сконцентрированы результаты большинства орбитальных проектов, отраженных в крупно- и промежуточно-масштабных схемах овала и полярной шапки и их «начинки» авроральными структурами. Схемы распределений и морфологии составляющих авроральных структур разных масштабов в области аврорального овала (при индексе Q=4 по иерархии Г. Старкова [Старков, 2000])



Рис. 5. Схематичные иллюстрации (a) структур конвекции и их возможной транспортировки через полярную шапку при увеличении числа каналов потока плазмы в полярной шапке(б)

Таблица 3. Основные свойства локализованных структур авроры (относится к правому рис. 4) даются расшифровки названий только части структур от 1 до 10 и показаны их характеристики в подлинной форме. Перевод на русский язык названий структур приведен в комментарии под таблицей.

Табл	ица 3.		<b>Basic Properties of Localized Aurora</b>								
Number in Figure Name		Location		Size			Particles, <sup>a</sup>	Solar Wind <sup>b</sup>			
		CGM, deg	MLT, hours	Latitude, deg	MLT, hours	Time, min	e p	Bz	B <sub>y</sub>	Pressure	Driver
1	MSP, DDA SPF	60-70	10-14	2-5	3-5	5-15	2-10, >10	positive	any	jump	pressure pulse
2	South IMF cusp	58 - 70	10 - 16	1 - 3	3-6	10 - 200	0.1 - 0.2, 1 - 2	negative	any	high	southward IMF
3	North IMF cusp	75-85	9-16	2 - 5	1 - 3	20 - 500	0.1 - 0.2, 1 - 2	positive	any	high	northward IMF
4	1500 MLT spot	70 - 80	14 - 16	2 - 4	1 - 2	20 - 100	0.3-3, none	any	negative	any	region-1 current
5	afternoon detached arc	60-70	14-20	1-5	1-4	30-120	$1-10,^{c} > 20^{c}$	positive	positive	any	change $B_z$ or $B_y$
6	HiLDA	73-88	10 - 18	2 - 6	1 - 2	20 - 700	1-5, none	positive	positive	low	strong $B_v$ positive $B_z$
7	SAMPS	56 - 68	04 - 12	2 - 3	<1	30 - 2400	none, >20	any	any	any	plasmasphere refilling
8	ECP	58-65	18 - 03	1 - 2	<1	100 - 200	>10,° 10-20°	positive	any	?	storm recovery
9	Polar cap are	70-90	20-04	10-40	<1	60-120	0.1-5, 1-20	positive	any	any	reconnection
10	Auroral streamer	60 - 70	20 - 03	3-5	<1	5 - 10	1-10, 10-30	see [Mcl	Pherron et	al,,2020]	bursty bulk flow in tail
<sup>a</sup> Fi	rst value given indicat	tes electrone	s second	value indic	ates nro	tons					

<sup>b</sup>An entry of "any" means that no preferred value of this solar wind property was found that creates the aurora. It does still allow for a different appearance of the aurora as in the case of the cusp aurora where a negative or positive  $B_y$  moves the aurora prenoon or postnoon. Note that the two flavors of detached arcs and ECP are either created by pure electrons or by pure protons. The two listed particle populations never occur simultaneously. Adapted from Frey, 2007

Перевод комментариев к таблице 3:

а) Первое значение в первой колонке указывает на электроны; а во второй колонке значение указывает на протоны.

b) Any «любой» означает, что не было обнаружено предпочтительного значения этого свойства солнечного ветра, которое создает полярное сияние. Появление аврорального свечения, например в полярном каспе, когда отрицательное или положительное значение Ву «перемещает» структуру авроры влево или вправо от полудня, т.е. до или после полудня MLT.

с) Две разновидности отдельных дуг и ECP (Evening Corotating Patches) создаются либо только электронами, либо только протонами. Две перечисленные популяции частиц никогда не происходят одновременно.

Список 1-10, и аббревиатур в таблице 3:

1 - полуденные субавроральные пятна или субавроральные протонные вспышки (MSP – Midday Subauroral Patches; SPF – Subauroral Proton Flashes); DDA – Dayside Detached Aurora);

2 – авроральное свечение дневного каспа (dayside cusp aurora associated with equatorial magnetopause reconnection);

3 – авроральное пятно каспа (cusp auroral spotassumed to be the result of antiparallel reconnection at the high latitude magnetopause);

4 – послеполуденное горячее пятно (arises from the increased upward current in this region);

5 – послеполуденные регистрируемые дуги (associated with the plasmaspheric plume and generated by proton resonance with EMIC waves);

6- высокоширотная аврора на дневной стороне (results from a parallel potential that develops to balance pressure with the solar wind plasma during periods of low solar wind density); HILDA – High Latitude Dayside Aurora;

7 – субавроральные утренние пятна от высыпаний протонов (subauroral morning proton spots); SAMPS – Subauroral Morning Proton Spots;

8 – вечерние коротирующие пятна (evening corotating patches); ECP – Evening Corotating Patches;

9 – дуги в полярной шапке, вытянутые в направлении полдень-полночь,  $\theta$  – аврора (though ionospheric flows and changes in IMF By have recently been shown to be good candidate mechanisms);

10 – авроральные стримеры (auroral streamer), см. рис.3

Расшифровка аббревиатур и перевод названий на рис.4:

PMAF – poleward moving auroral forms [Fasel, 1995] – авроральные формы, движущиеся в сторону полюса;

Polar-cap patches – пятна полярной шапки;

Polar cap arcs – дуги полярной шапки;

TCV – Traveling Convection Vortices – путешествующие конвекционные вихри;

Propagating vortices – распространяющиеся вихри;

Progressing potential pinch – прогрессирующие сужения потенциала;

Advancing traversing flow channels - продвижение пересекающих каналов потока

Важно заметить, что авроральные структуры всех масштабов отображают форму и расположение локальных неоднородностей электронной концентрации, если «смотреть» на них сверху (с орбит КА) или снизу с поверхности Земли. При этом изображения локальных распределений интенсивности эмиссий, излучаемых в F- и E-слое, получаемые одновременно с орбит (например в эмиссиях λ630,0 [OI] и λ427,8 N<sub>2</sub><sup>+</sup> нм, и в ВУФ диапазоне LBHN<sub>2</sub> и λ135,6 [OI]) позволяют картографировать распределения потока энергии и средней энергии высыпающихся электронов, а, следовательно, и распределения поперечных проводимостей полярной ионосферы [Кузьмин и др., 2016, 2019]. Информация о вертикальной структуре локальных неоднородностей ( $\delta N_{e}$ ) в 3D может быть реконструирована по результатам 2D-изображений авроральных эмиссий, полученных одновременно в разных ракурсах с орбит двух КА и поверхности Земли (см., например, [Кузьмин и др., 2017; 2019-2; Кузьмин и Мерзлый, 2019-1]. Высотную структуру продольных токов и поперечных замыкающих токов (в конкретных условиях) можно получать только с помощью приборов, установленных на платформах зондирующих ракет, отделяемых на разных высотах [Kaeppler, 2013], причем наиболее информативный вариант этих наблюдений, когда запуск ракеты скоординирован с пролетом КА, на котором измеряются N<sub>e</sub>, потоки высыпающихся частиц, и градиенты электрического и магнитного поля [Kaeppler et al., 2012; Kaeppler, 2013; Lynch et al., 2015; Cohen et al., 2020; Lessard et al., 2019; Fritz et al., 2019; Karlsson et al., 2020].

### 4.1.2 Циклонический вихрь вблизи каспа - новая открытая структура в полярной ионосфере

В недавней работе [Zhang et al., 2021-1] рассмотрены детали условий возникновения и характеристики светящейся пятнообразной структуры, названной авторами этой работы «космическим циклоническим вихрем (hurricane)», образовавшемся примерно в области северного геомагнитного полюса, там же, где HiILDA, и имеющим несколько тангенциальных «рукавов» с направлением вращения против часовой стрелки. Так как «космический вихрь» позиционируется как новая авроральная структура, то показываем его изображение на рис. 6 (с), полученное с помощью изображающего ВУФ-спектрометра SSUSI ( $\lambda\lambda$ 140-150 нм) с орбиты KA DMSPF16 20.08.2014 в 16.18.00 UT. Условия возникновения «вихря», распределения высыпающихся электронов и ионов, показаны на этом же рис. 6 (a,b), а также конфигурация продольных токов, полученная с орбиты KA AMPERE (d), и схематическое изображение механизма его образования на рис. 6 (e,f).

#### 4.1.3 Мелкомасштабные структуры авроры

Множество типов мелкомасштабных (1–5 км) авроральных структур, как автономных на фоне диффузной авроры, так и входящих в состав более крупномасштабных форм, наблюдались с поверхности Земли в течение многих лет [Oguti, 1975; Hallinan, 1981; Trondsen and Cogger, 1997,1998; Dahlgren et al., 2008; Sandahl et al., 2011]. Орбитальные исследования характеристик мелкомасштабной авроры начались уже в 21 веке и были связаны с наблюдениями с орбит КА REIMEI (INDEX), е-POP, FENGYUN, SWARM. Результаты части из них, касающихся средне- и мелкомасштабных наблюдений авроральных эмиссий одновременно с характеристиками плазмы, можно увидеть в обзоре [Кузьмин и Мерзлый, 2019-1].

На рисунке 7 вверху представлено несколько примеров фото-изображений, полученных с поверхности Земли, и с помощью аврорального имаджеров МАС на орбите КА REIMEI (верхняя панель) и FAI на орбите КА е-POP, иллюстрирующих природные авроральные структуры в рамках диапазона спектра их поперечных пространственных масштабов ( $w_{\perp}$ ) от <100 м до 10 км, адаптированных из работ [Sandahl et al., 2011; Karlsson et al., 2020], которые были собраны авторами в [Knudsen, 2001; Partamies et al., 2010; Dahlgren, 2011; Sandahl et al., 2011]; а также условный спектр пространственных масштабов характеристик плазмы (цветные линии и стрелки), полученных с орбит КА FAST, FREJA и Cluster [Chaston et al., 2003; Johansson et al., 2007; Partamies et al., 2008; Marklund, 2009].

<sup>©</sup> Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова



Рис. 6.

Рис. 6. На панели (с): изображение «космического вихря» в спектральном диапазоне LBHl (λλ140-150 нм), полученное с помощью изображающего ВУФ-спектрометра SSUSI с орбиты КА DMSPF16; (а): компоненты магнитного поля Вх,Ву,Вz; горизонтальная и вертикальная скорость плазмы, температура электронов и ионов, компоненты межпланетного поля, условия в солнечном ветре P<sub>Dyn</sub>, SYM-H, и AE-индекс; (b) DMSPF16: горизонтальная и вертикальная скорость плазмы и температура электронов и ионов, продольный ток; поток энергии электронов и их средняя энергия, питч-угловое энергетическое распределение электронов и ионов; (d): распределение продольных токов, полученное с орбиты КА AMPERE. (e,f) Схема космического урагана и механизма его образования в чрезвычайно спокойных геомагнитных условиях с северным ММП и доминирующей Ву компонентой

![](_page_15_Figure_2.jpeg)

Adapted from: Dahlgren, 2011; Sandahl, 2011; Partamies, 2008; Johansson et al., 2007, Karlson et al., 2020; Miles et al., 2018

Рис. 7. Спектр пространственных и временных (Lifetime) масштабов авроральных структур по результатам исследований, проведенных с использованием наземных оптических данных [Dahlgren, 2008,2011,2012; Sandahl, 2011, Partamies, 2008; 2010; Karlson et al., 2020;], данных с орбиты КА е-POP [Miles et al., 2018] и КА REIMEI [Obuchi et al., 2008], а также данных характеристик плазмы, полученных с орбит КА FAST, FREJA, CLUSTER. Рисунок (внизу) основан на оригинальном рисунке из [Partamies, 2008].

### 4.2 Пространственная корреляция сцинтилляций трансполярных сигналов при пересечении авроральных структур

Aarons et al., [2000] были одними из первых авторов, которые продемонстрировали корреляцию между флуктуациями фазы GPS и авроральными возмущениями в условиях суббури. Статистические исследования показали, что авроральная область более чувствительна к фазовым, чем амплитудным сцинтилляциям, и что фазовые сцинтилляции происходят в широком диапазоне полярных широт в возмущенных условиях, подразумевая тесную связь с авроральным овалом и полярной шапкой [Spogli et al. 2009; Jiao et al., 2013]. В этих работах обнаружено усиление сцинтилляций, связанных с границами статистического аврорального овала. Также было обнаружено, что авроральные сцинтилляции чаще всего возникают около полуночи MLT, и что частота возникновения и интенсивность коррелируют с возмущением локального магнитного поля [Jiao et al., 2013]. Kinrade et al. [2012,2013] продемонстрировали пространственную корреляцию авроральных эмиссий (557,7 и 630,0 нм) с фазовыми сцинтилляциями на географической сетке и обнаружили косвенную связь между оптическим излучением и оф при значительной авроральной активности. Тематические исследования неоднократно подтверждали статистические выводы, что фазовые сцинтилляции связаны с повышением интенсивности полярных сияний и суббурей [Prikryl et al., 2015]. Hosokawa et al. [2014] обнаружили, что фазовые сцинтилляции усиливались в начале суббури и уменьшались к ее концу по мере того, как полярное сияние становилось более диффузным. Они подтвердили, что высыпания авроральных электронов и их отображения в верхней атмосфере и ионосфере, т.е. структуры авроральных эмиссий, на пути сигналов GPS часто коррелируют по пространству и по времени с возникновением фазовых сцинтилляций во время интервала суббури. В отдельных случаях при пересечении сигналом авроральных структур наблюдались эффекты, такие как потеря блокировки частоты сигнала (loss-of-lock) [Smith et al., 2008] и сбои цикличности [Prikryl et al., 2015].

В недавних работах [Wang et al., 2018, 2021] были показаны результаты, свидетельствующие о генерации дуг в полярной шапке при Bz>0 (в отличие от более ранних представлений об этом явлении в условиях только Bz<0), приводящих не только к фазовым сцинтилляциям пересекающих их трансполярных сигналов, но и интенсивным амплитудным сцинтилляциям, что является новой информацией (см. рисунки в [Wang et al., 2021]). Существенную роль в этих экспериментах сыграли наблюдения канадской сетью SuperDarn потоков плазмы с помощью радара в Inuvik, использованного для отслеживания движения по линии прямой видимости (LOS line-of-sight) продольных плазменных неоднородностей декаметрового масштаба [Greenwald et al., 1995]. Эксперименты неоднократно подтвердили, что фазовые сцинтилляции обычно вызываются неоднородностями на масштабах от сотен метров до нескольких километров. В то время как амплитудные сцинтилляции, как правило, вызываются неоднородностями в меньших масштабах от сотен метров до десятков метров, что подтверждается наблюдениями и моделированием (например, Moen et al., [2013]; Van der Meeren et al., [2014-2016]; Wang et al., [2016, 2018]).

Основываясь на наблюдениях с использованием нескольких методов и трехмерном MHDмоделировании в Zhang et al. [2020] был предложен механизм образования дуг полярных сияний (в том числе дуги полярной шапки) за счет продольного ускорения электронов через процесс Найта (Knight's current-voltage process) [Knight, 1973] и его дальнейших исследований [Lyons, 2013; Cai et al., 2021; Imajo et al.,2021], вызванный листами продольного тока (FAC), которые генерируются сдвигами потока в магнитосфере. За относительно недавний период вышел ряд оригинальных работ и обзоров, посвященных природным авроральным структурам в авроральном овале и полярной шапке, и характеристикам корреляций сцинтилляций навигационных сигналов, пересекающих эти структуры [Van der Meeren, 2015; 2018; Loucks et al., 2017; Frey et al., 2019; Hosokawa, 2019, 2020; Forsyth et al., 2020 и др.]. В ретроспективе десятилетия ряд работ исследовательских лабораторий в Европейских странах, США, Канаде и Австралии был посвящен анализу множества фактов пространственновременных корреляций сцинтилляций радиосигналов и изображений авроральных структур, полученных при пересечении волной авроральных структур, в которых с наземных станций измерялись конкретные авроральные эмиссии в различных секторах MLT северной и южной полярных зон одновременно с энергетическими распределениями высыпающихся электронов и продольных токов, полученных с орбит и траекторий зондирующих ракет, а также с результатами координированных радарных наблюдений характеристик ионосферы, см. [Van der Meeren et al., 2015; Jin et al., 2014, 2016-1, 2016-2, 2017; Prikryl et al., 2016; Moen et al., 2013; Spicher et al., 2015; Loucks et al. 2017; Semeter et al., 2017; Forte et al., 2017; Hosokawa et al., 2014]. Обзоры результатов, полученных в некоторых из этих работ, были проведены в наших статьях (см. комментарии к рисункам): рис.2 в [Кузьмин и др., 2016]; рис. 14 в [Кузьмин и др., 2019-2]; рис. 9 и 10 в [Кузьмин и Мерзлый, часть 2, 2019-1].

### 4.2.1 Пятна и дуги в полярной шапке как локальные источники плотной неоднородной плазмы на высотах F-области

### 4.2.1.А. Сгустки плазмы (bubbles) и пятна в полярной шапке и их корреляция со сцинтилляциями сигналов орбитальных навигационных систем

В 2019 и 2020 гг. вышло два фундаментальных обзора: [Hosokawa et al., 2019] "Airglow Patches in the Polar Cap Region: A Review", а в 2020 г. не менее фундаментальный обзор [Hosokawa et al., 2020] "Aurora in the Polar Cap: A Review", информация в которых свидетельствует о том, что в период 2015-2020 гг. акцент в авроральных исследованиях был сделан на генерации и конвекции плазменных сгустков (blobs) и пятен (patches), а также на трансполярных дугах (TPA), генерируемых в области дневного каспа и полярной шапке. Перенос пятен свечения с дневной стороны на ночную сторону полярной шапки, наблюдаемый Nishimura et al. [2020], занимал ~ 90 мин. В отличие от крупномасштабных изменений конвекции, это согласуется с магнитной структурой, связанной с солнечным ветром, когда его течение проходит через область незамкнутых силовых линии. Zou et al. [2015-b] наблюдали продвижение дуг полярной шапки через полярную шапку за приблизительно такие же периоды времени, и показали, как структуры усиленного потока распространяются через полярную шапку.

Комментарии к панелям рис. 8 (b, d, e, f) (из Carlson [1994], Carlson et al. [2008], Jin [2016-1]:

1. Изменчивость потока в плазме вблизи от границы переворота полуденной конвекции (см. номер 1 на рис. 8 (b)), приводит к потоку плазмы, поступающем с субавроральных широт (номер 2), запускающему процесс сегментации. Сегментированные пятна (два пятна) высокоплотной плазмы ~100-1000 км в поперечнике, показаны красным (номер 4) эти полярные «пятна» окружены плазмой более низкой плотности. Пятна переносятся в противосолнечном направлении через полярную шапку (номер 4), откуда они могут попадать в авроральный овал (номер 5) и попадая под высыпания электронов, генерировать структуры неоднородностей И интенсивные сцинтилляции (см. [VanDerMeeren, 2015, 2018]). Представляется вероятным, но еще не доказано, что пятна обратного потока являются объяснением, идущих на запад вытянутых «капель» (номер 6) часто встречающихся у вечернего провала.

2. Механизм градиентно-дрейфовой (GDI) плазменной неустойчивости рис. 8f, возникает при дрейфе плазмы соответствующего знака через крутой градиент плотности плазмы, перпендикулярный магнитному полю на высоких широтах [Keskinen and Ossakow, 1983]. Дрейф в противоположном направлении через градиент плотности плазмы создает поля поляризации, которые стабилизируют плазму от образования каких-либо неоднородностей. Теория была уточнена, чтобы учесть влияние высокоширотных авроральных токов на количественные пороги и развитие неустойчивости.

3. Экспериментально установлено, что неустойчивость плазмы Кельвина-Гельмгольца (Kelvin-Helmholtz, KHI) вызывается сдвигами скорости плазмы [Basu et al., 1988, 1990]. Keskinen et al. [1988] разработали теорию неустойчивости KHI с описанием, включающим добавление уточнения ионосферно-магнитосферной электрической связи. В настоящее время считается, что эта неустойчивость доминирует в структуре полярной шапки при знаке Bz ММП к северу, в частности, в дугах полярной шапки.

4. Разница в характеристиках неустойчивостей GDI (Gradient Drift Instability) и SHDI-KHI (Shear-Driven Instability Kelvin-Helmholtz) иллюстрируются на рис. 8е [Basu et al., 1988, 1990, 1995]. Для условий, опубликованных в Basu et al. [1988], колебания локальной скорости плазмы в электрическом поле (отклонение локальной электронной плотности  $\Delta E \left[\frac{MB}{M}\right] = f(\frac{\Delta N}{N} [\%])$  оказались в 10 раз сильнее для неустойчивости при сдвиге скорости (KHL), чем для механизма градиентно-дрейфовой неустойчивости.

<sup>©</sup> Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

![](_page_18_Figure_1.jpeg)

(a,b) Adapted from Carlson et al., 2007;2008; from «Dayside and Polar Cap Aurora», ed. by Sandholt et al., 2002 (d,f) Adapted from Keskinen et al., 1988, and from Keskinen and Ossakov, 1983

21

Рис. 8. Вверху (a, b) схематично показаны условия, характеризующие состояние ионосферы полярной шапки для южного (Bz<0) и северного (Bz>0) и положительного (By>0). Для (By<0) схемы должны быть зеркально отображены относительно оси симметрии полдень-полночь. Номинальные позиции и границы аврорального овала показаны для каждого условия, в координатах CGLT от 65° магнитной широты, в проекции, рассматриваемой сверху вниз на северный магнитный полюс.</li>
Заштрихованные области показывают усиления интенсивности эмиссии λ 630,0 нм в пятнах с высокой плотностью плазмы за счет реакции рекомбинации ионов O+ (см. реакции (6) и (7)), а также схематическое изображение на рис.8с, показывающее высотные профили 630.0 нм свечения атмосферы (красный изгиб) и высотные профили плотности ионов атомарного кислорода (~ концентрация электронов в F области) и молекулярного кислорода (черные кривые). Такие высотные профили эмиссии в полярной шапке бывают при ММП в южном направлении). Вытянутые вдоль направления к Солнцу полосы показывают дуги с эмиссие λ630,0 нм, возбужденные электронным ударом (ММП в северном направлении) на рис. 8a. Полые стрелки показывают направление дрейфа этих дуг в направлении утро-вечер и вечер-утро.
Эллипс, показанный пунктирной линией около центральной полярной шапки, представляет собой условное поле зрения ASIP (All-sky Imaging Photometer) на широте станции в пос. Туле (Thule, Greenland) для эмиссии λ630,0 нм на высоте 250 км. Для системы координат CGT (CGLT) фиксированные магнитные широты представляют собой круг, поэтому круговое поле обзора отображается в виде эллипсов [Carlson, 1994]. Номера 1-6 на рис.8b объяснены в Комментарии 1 к рис. 8. На рисунке 8g представляена расположение пятен в полярной шапке и блобов (сгустков) на границе аврорального овала [Jin, 2016]

<sup>©</sup> Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

5. Следует отметить, что не существует единого определения аврорального блоба (сгустка): Tsunoda [1988] различает пограничные и авроральные блобы; однако, [Basu et al., 1990] назвали крупномасштабные структуры пятнами полярной шапки, когда они были обнаружены в полярной шапке, и авроральными пятнами, обнаруженными в авроральной зоне. Если следовать терминологии Basu et al. [1990], то различаются два типа авроральных пятен: пятно типа 1 (BT-1) соединенное с материалом пятна высокой плотности полярной шапки, которое вошло в авроральную зону; и блоб типа 2 (ВТ-2) относящийся к увеличению плотности структуры плазмы, которая была сгенерирована локально в результате высыпаний частиц. Сходство граничных блобов (boundary blobs) и пятен по размерам (площади поперечного сечения поперек магнитного поля) убедительно свидетельствует о том, что граничные блобы – это реконфигурированные пятна [Tsunoda, 1988]. Для проверки этой гипотезы были проведены модельные работы [Robinson et al., 1985; Anderson et al., 1996]. Robinson et al. [1985] использовали двухъячеечную конвекцию и круглое пятно в центральной полярной шапке, чтобы показать реконфигурацию пятна полярной шапки. Пятно меняло форму при входе в окрестность полуночного сектора. Затем происходило ограничение по широте и «удлинение» его конструкции в продольном направлении, что подтверждалось наблюдениями. При моделировании пятно постоянно вытягивалось из полярной шапки. Это, скорее всего нереально, поскольку повторное пересоединение в хвосте, которое позволяет пятнам пересекать OCB (open-closed magnetic field line boundaries) [Burell et al.,2020], часто является импульсным. В реальности, пятна полярной шапки могут разделяться на субструктуры, когда они выходят из полярной шапки.

На рисунках 8 (b и g) показано, что в периоды южного ММП (Bz<0) устанавливается двухячеечная конвекционная картина вверху полярной ионосферы, которая может транспортировать плазму из области каспа через всю полярную шапку к ночному авроральному овалу [Van der Meeren et al., 2014 и ссылки в них]. Эта плазма, при входе в полярную шапку была предложена в качестве доминирующего механизма сегментации [Lorentzen et al., 2010; Zhang et al., 2013]. В пятнах электронной плотности полярной шапки на высотах области F, величина  $N_e$ , как минимум в 2 раза выше, чем в окружающей области. Такое определение широко использовалось при обнаружениях пятен электронной плотности с использованием данных с КА на низкой полярной орбите, таких как как DE-2, DMSP, CHAMP и Swarm [Spicher et al., 2015-2, 2017 и ссылки в них]. Их типичный размер ~100÷1000 км поперек полярной шапки. Пятна свечения и пятна электронной плотности проявляются как области излучения кислородных эмиссий  $\lambda$ 630,0 нм и  $\lambda$ 557,7 нм, возбужденных по реакции (6) диссоциативной рекомбинации  $O_2^+$  с ионосферными электронами в области F, создавая, в конечном счете, кислородные атомы в состояниях  $O(^1D)$  и  $O(^1S)$  [см. например, [Hosokawa et al., 2011]. Процесс, вызывающий это airglow излучение, можно описать следующей двухступенчатой реакцией [Hays et al., 1978] и ссылки в ней):

$$0^+ + 0_2 \to 0_2^+ + 0 \tag{5}$$

$$0_2^+ + e \to 0^* \tag{6}$$

Атомы кислорода в возбужденных состояниях  $O^{*(1}S, {}^{1}D)$  образуются в результате диссоциативной рекомбинации иона молекулы кислорода с ионосферным электроном, при релаксации которых (при переходе в основное состояние  ${}^{3}P$ ) излучаются кванты  $\lambda$ 557,7 и  $\lambda$ 630,0.

$$0^{*}({}^{1}\text{D}) \rightarrow 0({}^{3}\text{P}) + h\nu (\lambda 630,0 \text{ HM})$$
 (7)

$$0^{*}({}^{1}S) \rightarrow 0({}^{3}P) + h\nu (\lambda 557,7 \text{ HM})$$
 (8)

Высотные профили O<sub>2</sub>, O<sup>+</sup> и интенсивности эмиссии атомов кислорода λ630,0 нм показаны на рис. 8с.

Пятна свечения полярной шапки, известные как области с увеличенной интенсивностью эмиссии 630,0 нм, и обнаруживаемые наземными камерами всего неба на широтах вблизи каспа, уже почти четыре десятилетия назад признали аналогами пятен (плотности плазмы) полярной шапки. Раньше наблюдения свечения пятен не использовались широко для исследований ионосферных структур и сопряжения магнитосферно-ионосферных процессов в полярной шапке. За последние два десятилетия после интенсивного развития высокочувствительных имаджеров свечения атмосферы, оснащенных охлаждаемыми камерами ССD (Charge Coupled Device), стало возможным

визуализировать временную эволюцию и сложные пространственные структуры пятен свечения с увеличенным отношением сигнал/шум. Такой прогресс позволил не только использовать пятна свечения в качестве индикаторов конвекции плазмы в полярной шапке, но также и для исследования источников генерации мелкомасштабных плазменных неоднородностей в ионосферной F области [Zhang et al., 2021-2]. Hosokawa et al., (2009) разработали автоматическую процедуру идентификации, при которой пятна свечения airglow выявляются как airglow структуры с интенсивностью излучения выше фоновой (I<sub>630,0</sub> нм > 30 P).

Исследования в [Nishimura et al., 2014; Zou et al., 2015a; Wang et al. 2016; Lyons et al. 2016а] показали, что конвекция в центральной полярной шапке имеет не гладкую пространственную структуру. Как правило, конвекция охватывает быстро распространяющиеся мезомасштабные структуры, встроенные в более медленный «фон конвекции», и движение пятен тесно связано с этими мезомасштабными структурами, что было продемонстрировано в работах [Van Der Meerin, 2015, 2018] (см. пример на рис. 11 правая нижняя панель). Кеограмма интенсивности эмиссий в пятнах 03.11.2013 г. показана на правой верхней панели рис.11 в одном масштабе с АЕ-индексом. Структурирование пятен, образовавшихся в дневной полярной шапке, дрейфующих к полуночной области аврорального овала, расширяющегося к полюсу во время суббури, имеет существенное влияние на космическую погоду в полярной области (см. детали на рис. 9, 10, 11).

В [van der Meeren et al. 2015; Hosokawa et al., 2019] был приведен пример появления интенсивных фазовых сцинтилляций орбитальных навигационных систем в двух последовательных событиях (1 и 2) 03.11.2013 г., последовавших при достижении пятнами полярной кромки ночного аврорального овала, расширяющегося к полюсу во время суббури, он показан на 8 панелях рис. 9 (a,b,c,d,e,f,g,h), рисунках 10 и 11. All-sky изображения эмиссий λ630,0 нм и λ557,7 нм были получены синхронно со станций Ny-Alesund (о. Шпицберген) и Andoya (Норвегия). Компоненты ММП и другие сопутствующие условия показаны на верхней левой панели рис. 11, а АЕ-индекс наверху правой панели. Одновременные измерения характеристик сигналов навигационных спутников GPS, GLONASS и Galileo проводились множеством приемников, расположенных в северной Скандинавии координированно с оптическими измерениями в течение 35 мин с 20.25.00 по 20.51.00 UT (см. рис. 10). Уровни фазовых сцинтилляций показаны кружочками разных диаметров (индекс σ<sub>φ</sub>, шкала в рад.) на двух соседних станциях Ny-Alesund и Longyearbyen, расположенных на о. Шпицбереген на расстоянии ~120 км (см. участок карты на рис. 11), по-разному, но существенно увеличивались в различные моменты времени суббуревого возмущения (события 1 и 2 на рис. 11). Перед началом суббури (рис. 9 a,b) фазовая сцинтилляция была низкой ( $\sigma_0 < 0,2$ ) по всей контролируемой области, включая авроральный овал и конвектирующие пятна эмиссий. Когда юго-западный край пятна в полярной шапке приблизился к полярному краю аврорального овала, началась суббуря, и овал расширился в том числе и в сторону полюса. В областях, где пятно (airglow) «совместилось» с областью высыпаний электронов, интенсивность эмиссий в локальной части овала (там, где пятно достигло его полярного края), индекс фазовых сцинтилляций увеличился до значений  $\sigma_{\varphi} > 1$  (рис. 9b-с и 9f-g). При этом сцинтилляции в других частях овала оставались низкими. После того, как расширение овала замедлилось и интенсивность свечения эмиссий снизилась до пороговой, фазовые сцинтилляции «вернулись» к низким значениям ( $\sigma_0 < 0.2$ ).

Результаты исследований [van der Meeren, 2015, 2018] показали, что сигналы систем GPS, GLONASS и Galileo практически одновременно были подвержены интенсивным фазовым сцинтилляциям (рис. 9 и 10). Сравнение с авроральными эмиссиями прямой видимости в локализованных областях было проведено в работе [van der Meeren et al., 2015] и показано, что, когда используются данные сигналов, принятых приемниками разных типов GNSS (Global Navigation Sattelite Systems) с КА навигационных систем одновременно, то увеличивается вероятность того, что достаточное количество сигналов останется отслеживаемым во время одних и тех же сцинтилляционных событий в одних и тех же условиях. Т.к. сигналы всех трех типов систем были на частотах в диапазоне L (Ll, 1602.0–1615.5 MHz и L2, 1246.0–1256.5 MHz), ожидалось, что все эти системы подвержены подобным эффектам сцинтилляций. Отличия были скорее всего из-за локаций конкретных точек протыкания IPP (Ionospheric Pierce Point) сигналов разных систем с КА «находящихся» на разных высотах.

<sup>©</sup> Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

![](_page_22_Figure_1.jpeg)

Рис. 9. Пространственные корреляции величин индекса фазовых сцинтилляций сигналов σ<sub>φ</sub> (от 0.2 до 1.5 rad) трех орбитальных навигационных систем (GLONASS, GPS и Galileo) в точках протыкания ионосферы локальных пятен свечения и неоднородностей Ne вблизи станции Longyearbyen (o. Шпицберген) и Andoya 03.11.2013, нанесенных на карты полей зрения меридонально-сканирующих фотометров (MSP) в кислородных эмиссиях λ630,0 нм (верхняя панель) и λ557,7 нм (нижняя панель)

В работах [Carlson et al., 2007, 2008] подтвердились предположения, что локальные пятна могут быть изначально структурированы неустойчивостью Кельвина-Гельмгольца в области сегментации дневного пятна, создавая затравки неоднородностей, которые позволяют градиентно-дрейфовой неустойчивости структурировать пятно в меньших масштабах во время его транзита через полярную шапку. В то время как градиентно-дрейфовая неустойчивость наиболее эффективна на задней кромке структур плотности, моделирование показало, что неоднородности могут распространяться от заднего края во внутреннюю часть пятна, структурируя его в различных масштабах [Gondarenko and Guzdar, 2004]. Это подтвердилось и наблюдениями, проведенными в Канаде [Hosokawa et al., 2009-2].

![](_page_23_Figure_2.jpeg)

Рис. 10. На левых панелях: развертки интенсивности эмиссий  $\lambda$ 557,7 и  $\lambda$ 630,0 нм в интервале 20.30-21.30 UT 03.11.2013, полученных на станциях Ny-Alesund (вверху) и Longyearbyen (внизу), под каждой из них развертки индекса фазовых сцинтилляций сигналов навигационных орбитальных систем Galileo, GPS, и GLONASS $\sigma_{\phi}$  (в ед. гаd.) и развертки фазовых спектрограмм. На правых панелях All-sky изображения эмиссии  $\lambda$ 557,7 нм (на соответствующих станциях, расположенных в 120 км друг от друга), на которых цветными значками нанесены места сцинтилляций сигналов Galileo, GPS, и GLONASS, цветом маркирована интенсивность сцинтилляций.

### 4.2.1.В. Дуги в полярной шапке, как источник амплитудных и фазовых сцинтилляций в условиях изменения знака Вz ММП с (-) на (+).

В настоящее время для этого типа авроральных структур чаще используется термин «трансполярные дуги» (ТРА аббревиатура transpolar arcs), чем «тета-аврора». В отличие от процесса возбуждения атомов кислорода в пятнах полярной шапки за счет диссоциативной рекомбинации ионов  $O_2^+$ , кислородные эмиссии в ТРА возбуждаются при столкновениях атомов с электронами, имеющими энергию  $E_e>2-5$  эВ) при высыпании из ближней магнитосферы.

![](_page_24_Figure_3.jpeg)

Рис. 11. Кеограмма интенсивностей эмиссий λ630,0 и λ557,7 нм (события 1 и 2 во время суббури), полученная в интервале 19.00-23.00 UT 03.11.2013 меридионально сканирующим фотометром MSP на станции Ny-Alesund (о. Шпицберген) (правая верхняя панель) с разверткой АЕ-индекса сверху. Компоненты ММП и условия в солнечном ветре (левая верхняя панель). Распределение скорости конвекции плазмы, наложенная на карту, полученная сетью радаров SuperDARN (правая нижняя панель) [Greenwaldetal., 1995]. Карта северной полярной области с расположениями полей наблюдения All-sky камер на станциях Ny-Alesund, Longyearbyen и Andoya на высоте 250 км, и направлением сканирования фотометром MSP на станции Ny-Alesund (левая нижняя панель) в масштабе с картой конвекции на правой нижней панели.

По определению, структура тета-авроры появляется в полярной шапке с полуночи до полудня MLT. Однако это не всегда так на протяжении продолжительности жизни дуги. Часто TPA начинают формироваться в утреннем или вечернем овале, прежде чем они начинают двигаться в сторону полюса и становятся действительно «тета-авророй» [Cumnock et al., 2004, 2009]. Zhang et al. [2016] показали, что множественные TPA скорее «вытянуты» к каспу (см. рис. 12а), чем в сторону Солнца, т.к. их дневные концы «стремятся» к каспу. В [Maggiolo et al., 2012] было показано, что источниками и высотными признаками множества дуг полярной шапки TPA могут быть множественные ионные пучки, появляющиеся на расстоянии нескольких радиусов Земли над полярной шапкой. Zhang et al. [2016] предположили, что неустойчивость Кельвина-Гельмгольца (KH) (которая появляется во время северного ММП), и/или (interchange instability) неустойчивость взаимообмена – это возможные источники генерации множества дуг в полярной шапке (рис. 12а). В модели [Zhang et al., 2020] неустойчивость появляется вдоль низкоширотной дневной магнитопаузы (см. схему на рис. 12b). Тогда порожденные неустойчивостью КН волны приводят к сильным сдвиговым потокам, которые, в свою очередь, могут генерировать множественные продольные токи, проецируемые в полярную шапку (рис. 12b).

![](_page_25_Figure_2.jpeg)

Рис. 12. Трансполярные дуги (ТРА), вытянутые к каспу при Bz> 0. (а) Множественные дуги, вытянутые к каспу, наблюдавшиеся на изображениях SSUSI LBHS со спутника DMSP F17 15 мая 2005 г. в 17.38 UT; (b) Модель Zhang et al. (2016), объясняет механизм возникновения нескольких дуг, вытянутых к каспу, в результате генерации неустойчивости Кельвина-Гельмгольца, возникающей во время северного ММП вдоль дневной магнитопаузы; (с) изображение каспа и части аврорального овала в линии Ly-α, отображающее высыпание протонов при реакции перезарядки с атомами водорода в той же области, полученное одновременно с изображением (a). Рис.12 a,b,c адаптированы из [Zhang et al. 2016].

Морфология мелкомасштабных ТРА интенсивно изучалась в 70-х и начале 80-х с использованием наземных фотометров с усилением интенсивности, расположенных в полярной шапке), и с тех пор ТРА были известны как «ориентированные на Солнце дуги». В 70-х годах или 80-х, уже было известно, что мелкомасштабные дуги, вытянутые к Солнцу/к каспу, бывают, когда Вz направлено к северу. Эти структуры интенсивно изучались с помощью комплексов орбитальных и наземных средств диагностики. Такие более ранние наблюдения вплоть до конца 90-х годов проанализированы в обзорах Zhu et al. (1997) и Hosokawa et al. (2020). Помимо крупномасштабной структуры множества дуг ТРА, мелкомасштабные радиально ориентированные элементы «встроенные» в дуги, и являются их внутренними подструктурами, представляющими расширение дуг по высоте (рис. 13а). Эти подструктуры не связаны с удлинением дуг ТРА [Zhang et al., 2020]. Т.к. в этой работе представлены комплексные результаты измерений и результаты моделирования, рассмотрим событие 7 сентября 2017 г. подробнее.

7 сентября 2017 г. в условиях продолжительного и относительно стабильного направления IMF к северу (IMF Bz > 0 в течение более 8 часов) возникли относительно стабильные условия солнечного ветра, за исключением некоторых вариаций ММП, и динамического давления солнечного ветра, увеличенного около 12:30 UT (рис. 13 вверху слева). IMF к северу достигло около 8 нТл и были примерно стабильными, с Ву-компонентой около 4 нТл и высокой скоростью солнечного ветра около 520 км/с (см. интервал, выделенный серо-бежевым фоном). Эти условия благоприятны для запуска неустойчивости Кельвина – Гельмгольца между солнечным ветром и магнитосферой [Li et al., 2013;

© Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

Wang et al., 2016] и, в конечном счете, генерации множества дуг в полярной шапке, вытянутых к каспу, [Zhang et al., 2016]. Наименьшее (AL) и наибольшее (AU) значения геомагнитных вариаций в горизонтальной составляющих наблюдалось в 11 выбранных обсерваториях вдоль авроральной зоны в северном полушарии, после 15:30 UT (левый верхний рис. 12), Индексы аврорального электроджета AL и AU показали несубуревые условия, т.е. авроральный овал оставался стабильным.

Результаты оптических одновременных (с орбиты и наземной станции) наблюдений ТРА 07.09.2017 г. в южной полярной шапке, представлены на рис. 13 а-е. К полюсу от аврорального овала, на рис. 13а видны не менее шести ярких ТРА в ВУФ-изображении, полученном с орбиты КА DMSP F17 имаджером SSUSI в спектральном диапазоне LBHs λλ140-150 нм, в который попадали кислородная эмиссия  $\lambda 135,6$  нм и несколько полос коротковолновой части полос LBH N<sub>2</sub>. Кроме того, есть несколько радиально вытянутых дуг в пределах утренней (-70 до -78° MLAT) и вечерней (от -70 до -77° MLAT) сторон аврорального овала. Некоторые из ТРА были ярче основного аврорального овала с более яркими пятнами внутри них, которые сохранялись более 2 часов, включая их эволюцию и распад. На панелях b-е рис. 13 показана временная эволюция одной ТРА в течение трех минут 16.13-16.16 UT, зарегистрированная с помощью All-sky имаджера 557.7 нм на китайской антарктической станции Zhongshan (ZHS) [Zhang et al., 2020]. Продольные токи (FAC), зарегистрированные магнитометром SSM вдоль трассы КА DMSP, показали, что каждая дуга была связана с восходящим FAC (рис. 13 a и f). Незначительные смещения могут быть объяснены разницей в высоте между двумя наборами данных. Потоки энергичных электронов, полученные одновременно с SSJ5 (рис. 12g) также «выявили» множество мелких дуг, которые были не видны на изображениях SSUSI, имеющего ограниченное пространственное разрешение и чувствительность (рис. 13а). Потоки энергии электронов (рис. 13g) показали, что каждая дуга полярных сияний была связана с высыпанием электронов, ускоренных до энергии более, чем 1 кэВ. Связь ТРА с наблюдаемыми локализованными ионными высыпаниями неоднозначна, но она могла быть, также как и в событии 01.04.2004 г. наблюдавшихся восходящих ионных пучков (не показаны), зарегистрированных на спутниках Cluster, и проанализированных в Maggiolo, et al., 2012.

Уместно упомянуть, что в работах [Израйлевич и Кузьмин, 1989; Izraelevich et al., 1990] были представлены результаты наблюдений, проведенных с помощью фотометра ЭМО-5 с орбиты КА ИК-Болгария-1300 11.01.1983 г. при пересечении множества дуг полярной шапки примерно в таких же условиях, как в показанном примере из [Zhang et al., 2020]. В этих данных на двух орбитах были обнаружены не только максимумы интенсивности эмиссий  $\lambda$ 630,0 [OI],  $\lambda$ 557,7 [OI] и  $\lambda$ 427,8 N<sub>2</sub><sup>+</sup> почти во всех дугах множества ТРА, в некоторых из них были зарегистрированы максимумы интенсивности эмиссии дублета иона кислорода  $\lambda$ 732,0-733,0 нм [OII], что подтверждалось питч-распределением ионов в данных прибора АНЕПЕ на КА ИК-Болгария-1300 и свидетельствовало о потоках ионов кислорода от Земли [Zettergen et al., 2007].

Причинно-следственные связи, рассмотренной выше ситуации 07.09.2017 г., смоделированные в магнитосфере [Zhang et al., 2020], показаны на рис. 14. Был использован код программы PPMLR-MHD (Piecewise Parabolic Method with a Lagrangian Remap to MHD - Кусочно-параболический Метод с лагранжевым преобразованием в MHD, построенной на основе работ [Tang et al., 2018]. На рисунке 14 в координатах GSM [R<sub>E</sub>] (см. сноску<sup>1</sup>): (**a,b**) – Отображение 2D-распределения продольных токов (FAC) в двух плоскостях в координатах X-YGSM [R<sub>E</sub>], рассчитанных для условий 7 сентября 2017 г. при помощи кода модели PPMLR-MHD (Piecewise Parabolic Method withaLagrangianRemaptoMHD - Кусочно-Параболический Метод с Лагранжевым Преобразованием в MHD), построенной на основе работ [Hu et al, 2007; Tang et al., 2018]; отображение продольных токов (**b**), вытянутых вдоль поля из экваториальной плоскости от магнитосферы до ионосферы (в южном полушарии); (**c,d**) – отображение векторов скорости плазмы (масштаб показан в правых верхних углах в км/сек) , измеренных с KA THEMIS-B и THEMIS-C в плоскости  $X^{GSM}$ - $Y^{GSM}$ , показаны в виде временных рядов векторов скорости плазмы без тренда, наблюдавшиеся со спутников THEMIS B (слева) и THEMIS C (справа);

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Система координат GSM: Ось X системы координат GSM определяется вдоль линии, соединяющей центр Солнца с центром Земли. Начало координат определено в центре Земли и положительно по отношению к Солнцу. Ось Y определяется как произведение оси X GSM и оси магнитного диполя; положительно направлен к сумеркам. Ось Z определяется как произведение осей X и Y. Ось магнитного диполя лежит в плоскости XZ [NationalCentersforEnvironmentalInformationNOAA].

![](_page_27_Figure_1.jpeg)

Рис. 13. Результаты комплексных наблюдений множества ТРА 07.09.2017 в южной полярной шапке. На панели слева вверху: (А) компоненты ММП; (В) скорость солнечного ветра и концентрация; (С); динамическое давление; (D) АЕ и АU – индексы. На панели (а) развертка ВУФ-изображения в диапазоне λλ140÷150 нм, полученного 07.09.2017 сканирующим спектрометром SSUSIc орбиты КА DMSPF17, шкала интенсивности дана цветом в Рэлеях, продольные токи также маркированы цветом (правая шкала): красным (вверх), синим (вниз); (b,c,d,e) серия All-sky изображений дуги в авроральном овале в эмиссии λ557,7 нм, полученное на китайской Антарктической станции Zhongshan (интенсивность показана цветом в имп.); (f) развертка
продольных токов, полученных с магнитометра SSM с орбиты КА DMSPF17; (g,h) спектрограммы электронов и ионов в авроральном диапазоне энергий, полученные 07.09.2017 с помощью спектрометра SSJ5 с орбиты КА DMSPF17, логарифмическая шкала потока энергии электронов и ионов показаны цветом справа, а средней энергии слева. На средней панели слева показана локация китайской антарктической станции наблюдений доказана локация китайской антарктической станции наблюдений Zhongshan (ZHS), а также поле наблюдений японского радара (SuperDARN) SENSU, сканирующего потоки плазмы в солнечном и антисолнечном направлениях.

![](_page_28_Figure_1.jpeg)

PPMLR-MHD Model Field-aligned currents (FACs) & Velocity 16:10:00 07 Sep 2017 Field-aligned mapping to the Southern ionosphere

Рис. 14. Условия генерации ТПА 07.09.2017, смоделированные в магнитосфере с помощью модели PPMLR-MHD (Piecewise Parabolic Method with a Lagrangian Remap to MHD - Кусочно-Параболический Метод с Лагранжевым Преобразованием в MHD) [Zhang et al., 2020].

местоположения КА THEMIS отмечены красными звездочками на (а). Векторы скорости на (c) и (d) отображены разными цветами каждые 10 мин. Как наблюдения, так и результаты моделирования показаны с разрешением по времени 20 с, они были смещены на 0,3  $R_E$  в направлении X в (c) и (d) для облегчения сравнения. В модели использованы измеренные межпланетные условия в качестве входных данных. Белая (пустая) область полярной шапки в дневном секторе на (b) находится на силовых линиях, не пересекающих экваториальную плоскость X-Y, из-за значительной составляющей IMF By, приводящей к искажению хвоста магнитосферы, и/или вне области моделирования.

Результаты наблюдений и моделирования события 7 сентября 2017 г. подтверждают существование множественных сдвигов потоков (flow hears) во всей магнитосфере от долей (lobe) магнитопаузы до хвоста магнитосферы при направленном к северу Вz ММП. Сдвиги потока напрямую приводят к множеству листов FAC, которые соединяются в области каспа в обоих полушариях и продольному ускорению электронов, которые создают дуги сияний, вытянутые в сторону каспа, как в полярной шапке, так и в авроральном овале.

Авторами [Zhang et al., 2020] электростатическая ионосферная оболочка с интегрированной по высоте проводимостью была встроена в MHD код, что позволяло учесть связь для расчета FAC между ионосферой и внутренней границей модели магнитосферы. На рисунке 13а показаны двухмерные смоделированные FAC и векторы скорости плазмы в геоцентрической плоскости X-Y в координатах (GSM Geocentric Solar Magnetosphere) [ $Z \sim -1$  R<sub>E</sub> для лучшего захвата явления в Южном полушарии]. Хвост магнитосферы находится слева, а подсолнечная магнитопауза - справа. Красным цветом показаны пары сильных и нитевидных FAC (синий цвет), созданных листами сдвига потока вокруг дневной стороны магнитопаузы на обоих флангах в низкоширотном пограничном слое (LLBL Low Latitude Boundary Layer) благодаря неустойчивости Кельвина-Гельмгольца (KHI). Формирующиеся листы сдвига потока и FAC добавляются, в то время как предыдущие листы сдвига постепенно продвигаются внутрь и назад). Некоторые из этих FAC объединяются с уже существующими FAC, а другие остаются отдельными и ослабевают. Эти направленные вверх FAC вызывают ускорение, магнитосферных электронов вдоль магнитного поля вероятно через вольт-амперный процесс Найта (Knight's current-voltage process) [Knight,1973; Cai et al., 2021], вызванный листами продольного тока FAC, которые генерируются сдвигами потока в магнитосфере. Электроны высыпаются в полярную ионосферу и генерируют движущиеся к полюсу дуги полярных сияний в авроральном овале [Maggiolo et al., 2012; Wing et al., 2015]. Об этом механизме ускорения уже было упомянуто в п. 4.2.

Комментарий. Узкий и квазиустойчивый восходящий FAC появляется около Y = 0 R<sub>E</sub> и распространяется вниз хвоста магнитосферы от X = -10 до -100 R<sub>E</sub> в начале, а потом локально распадается внутри центрального плазменного слоя на около -20 R<sub>E</sub> в связи с усилением хвостовых потоков от около 15:10 UT. Затем, примерно в 15:45 UT, произошли сильные всплески в сторону Земли поток поступает из дальнего хвоста (менее -100 R<sub>E</sub>). Когда эти направленные к Земле и хвостовые потоки с FAC встречаются друг с другом около -35 R<sub>E</sub>, они разделяются и образуют несколько листов сдвигов потока и FAC, которые простираются на рассветный и сумеречный фланги хвоста магнитосферы, и сливаются с развитыми флангами неустойчивости КНІ, которые приводят к сложной системе токов преобладающих FAC. Они приводят к большому количеству нитевидных FAC и связанных с ними потоков, заполняющих хвост магнитосферы (включая плазменный слой и lobes доли, рис. 13а), что делает их источниками интенсивных структурированных высыпаний электронов, которые генерируют множественные дуги полярных сияний в полярной шапке и авроральном овале. При условии относительно стабильных компонент ММП и скорости солнечного ветра, стабильные множественные трансполярные дуги, представленные в этой статье, не могут быть полностью объяснены более ранними моделями или теориями, например: моделью колеблющегося (twisting) хвоста магнитосферы за счет включения Ву ММП [Kullen, 2004], моделью пересоединения хвоста во время северных несуббуревых интервалов ММП [Milan et al., 2005, Fear et al., 2012, 2015], и моделью взаимообменной неустойчивости (interchange instability) [Rezhenov,1995; Golovchanskaya et al., 2003], а также моделью мелкомасштабных вытянутых к Солнцу дуг на замкнутых силовых линиях [Tanaka et al., 2017]. Важно заметить, что процессы, представленные в этой статье, происходят как на открытых, так и на замкнутых линиях поля, указывая на то, что ТРА могут возникать на любой линии поля, независимо от того они открыты или закрыты до тех пор, пока есть сдвиги потоков плазмы. Эти

<sup>©</sup> Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

результаты разрешили споры, длившиеся несколько десятилетий: на открытых или закрытых линиях поля могут генерироваться множественные нитевидные трансполярные дуги?

Наблюдения и моделирование [Zhang et al., 2020] показали отличное согласие и свидетельствуют, что множественные TPA генерируются при высыпаниях энергичных магнитосферных электронов в слоях продольных токов (FAC). Слои продольных токов образуются при сдвигах многих потоков плазмы на обеих границах магнитосферы, производимых неустойчивостью Кельвина – Гельмгольца между сверхзвуковым потоком солнечного ветра, плазменным слоем магнитосферы, генерированным при взаимодействии между усиленными потоками плазмы, направленными к Земле из дальнего хвоста (менее  $-100 R_E$ ), и усиленными потоками в ближнем хвосте (около  $-20 R_E$ ). Исследования [Zhang et al.,2020] продемонстрировали, что орбитальные и наземные наблюдения за авроральными структурами предоставляют реальный способ контролировать процессы сопряжения в системе солнечный ветер-магнитосфера-ионосфера, происходящие в широком диапазоне временных и пространственных масштабов при северном ММП.

### 5. СОВРЕМЕННЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ ДИАГНОСТИКИ ПРОЦЕССОВ В ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЕ, ПРИВОДЯЩИХ К СЦИНТИЛЛЯЦИЯМ СИГНАЛОВ, И ИХ МОДЕЛИРОВАНИЮ, В РАБОТАХ [Deshpande et al., 2016 И Deshpande AND Zettergen, 2019] И [Spicher et al., 2020]

Т.к. крупномасштабная конвекция плазмы в высокоширотной ионосфере может порождать различные типы неустойчивостей в зависимости от конкретного местоположения (авроральный овал, касп и полярная шапка), геомагнитных условий, наличия продольных токов, и скорости конвекции (например, Basu et al. [1994]; Keskinen & Ossakow [1983]; Wang et al. [2016]). Их результаты показали, что именно неустойчивости в плазме ответственны за создание ионосферных структур и неоднородностей пространственных масштабов от нескольких сантиметров до нескольких десятков километров.

Коротко рассмотрим примеры двух вариантов локализации сцинтилляций и моделирования механизмов их генерации:

1) сцинтилляции на границах пятен в полярной шапке и влияние доминирующего процесса, неустойчивости GDI (Gradient-Ddrift Instability) на создание неоднородностей плотности их генерацию сцинтилляций [Deshpande и Zettergen, 2019]

2) сцинтилляции в области каспа и влияние на их генерацию неустойчивости KHL (<u>Kelvin-Helmholtz instability</u>) [Spicher et al., 2020]

## **5.1 Наблюдения и моделирование сцинтилляций GPS-сигналов во время дрейфа пятна с повышенной Ne, над станцией ResoluteBay 09.03.2012 г. в условиях суббури** [Deshpande и Zettergen, 2019].

Основные драйверы градиентно-дрейфовой неустойчивости (GDI gradient-drift instability) включают перпендикулярные электрические поля, приводящие к относительно слабым токам в авроральных F-областях в направлении Педерсена (направление управляемое полем E<sub>0</sub>). Возбуждение GDI возможно при наличии градиентов плотности в направлении фоновой конвекции плазмы при наличии мелких затравочных структур [Tsunoda, 1988], и ссылки в нем). Результаты GDI в областях с низкой и высокой плотностью, вкрапленных в пузырьковые структуры, которые затем могут потенциально генерировать вторичные, связанные со сдвигом неустойчивости и нелинейной связью мод [Basu et al., 1990; Keskinen and Ossakow, 1983; Tsunoda, 1988]. В GDI-нестабильной ситуации затравочные возмущения нарастают через токи Педерсена F области в области неоднородной проводимости (т.е. поперек градиента плотности), что приводит к последовательности процессов: накоплению заряда и развитию поляризационных электрических полей; **E** × **B** дрейфам, и росту зерен структур. Считается, что GDI является основным источником неоднородностей области F на всем протяжении авроральной зоны и полярной шапки и часто ассоциируются со структурами повышенной плотности F-области, такими как пятна в полярной шапке и авроральные пятна [Basu et al., 1994; Moen et al., 2002]. Масштабные размеры производимых неоднородностей по GDI находятся в диапазоне от 100 м до нескольких километров.

Несколько физических процессов могут стабилизировать процесс роста GDI. При этом сильное увеличение плотности в Е-области представляет собой путь для «короткого замыкания» накопления

заряда, которое вызывает рост GDI и, следовательно, может частично или полностью подавить развитие неустойчивости. Кроме того, токи поляризации (из-за дрейфа поляризации ионов) могут также ослабить неустойчивость, по крайней мере, для небольших временных и пространственных масштабов [Gondarenko, et al.,1999; Gondarenko & Guzdar, 2006]. В целом было обнаружено, что токи поляризации имеют тенденцию подавлять режимы GDI меньшего масштаба, что приводит к несколько большим отклонениям от очень резких градиентов плотности [Huba et al., 1988]. Также считается, что токи поляризации потенциально могут приводить к ионосферной неустойчивости Кельвина-Гельмгольца (KHI Kelvin-Helmholtz Instability) в регионах, где GDI развивает сильные сдвиги (по краям чередующихся «пальцев» высокой и низкой плотности, которые развиваются в GDI), см. рис. 15.

Исследование в [Deshpande и Zettergen, 2019] проведено над станцией Resolute Bay во время геомагнитной бури 9 марта 2012 г. GDI генерировалась в основанной на физических механизмах модели плазмы GEMINI, а сигнал GPS L1 распространялся через ионосферные структуры с использованием полной трехмерной модели прямого распространения SIGMA (рис. 15). На этом рисунке, адаптированном из [Deshpande и Zettergen, 2019], проиллюстрирована последовательность использования кодов SIGMA и GEMINI и смоделированы неоднородности Ne в процессе генерации плазменной неустойчивости GDI, и как результат, генерации сцинтилляций сигналов на станцией Resolute Bay. Сигнал от спутника GPS испытывал рассеяние и интерференцию при распространении через область плазменной неустойчивости GDI в ионосфере, что приводило к флуктуациям сигнала, измеряемым на Земле приемниками GPS (изменения фазы показаны в примере). На рисунке 15(b) показаны последовательные снимки моделирования неоднородностей Ne и сцинтилляций сигналов, изображающие начало и затухание спинтилляции, когла пятно в полярной шапке проходило над приемником GPS. (строка 1) последовательность 2D- распределений плотности δN<sub>e</sub> через 50, 100, 150 и 200 сек; (строка 2) последовательность 2D-распределений фазы сигнала на земле соответственно, (строка 3) временная развертка 1D, показывающая изменения фазы (в рад.) от 1 до 200 секунды после поступления распределения Ne в модель. На рисунке 15(с) показано сравнение зависимости распределений PSD (power spectral density) спектральной мощности фазы сигнала GPS на станции Resolute Bay (красный цвет) и фазы, смоделированной с помощью GEMINI-SIGMA (синий цвет) от частоты в Гц, Вверху рис. 15d показано сравнение зависимостей наблюдаемой (зеленый цвет) и смоделированной (синий цвет) спектральной мощности сигнала (в Дб) от времени (в сек); внизу – сравнение временной развертки, наблюдавшейся на станции ResoluteBay (зеленый) и смоделированной фазы (в Рад) (синий) от времени (в сек).

Затем было проведено сравнение с результатами наблюдений сцинтилляций над Resolute Bay. Оказалось, что GDI приводила к сцинтилляции сигналов GPS с характеристиками очень близкими к наблюдаемым. Точно так же плотности электронов, используемые для инициализации GEMINI, сопоставимы с параметрами, оцененными с помощью SIGMA (с использованием спектральной модели), инверсии данных GPS, полученных в Resolute Bay, тем самым демонстрируя согласованность между основными результатами, полученными с использованием обоих подходов. Исследование, представленное в [Deshpande и Zettergen, 2019], позволило обнаружить сильное сходство как в моделировании, так и в наблюдениях с точки зрения спектрального и вейвлет-анализа. PSD демонстрируют фундаментальный уровень согласия с ранее использованной моделью спектральной неоднородности. Преобладающая спектральная мощность, по-видимому, сосредоточена в структурах размером от 1 до 4 км, что лежит в диапазоне рефракционных структур сигналов. Хотя не было значительного изменения мощности как в наблюдаемых, так и в моделируемых амплитудах сигналов, было предположено, что это произошло из-за ограниченной чувствительности к дифракционным структурам (в случае моделирования определяется пределами разрешения двух используемых моделей). Тем не менее, результаты моделирования распространения сигналов GPS через участок полярной шапки оказались близки к наблюдениям и полученным методом обратного моделирования.

© Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

![](_page_32_Figure_1.jpeg)

Rapted from Desilpande and Zettergen, 2017

Рис.15. (а) Иллюстрация последовательности использования дуэта кодов SIGMA-GEMINI для моделирования неоднородностей Ne в процессе генерации неустойчивости GDI, и, как результат, генерации сцинтилляций сигналов над станцией ResoluteBay. (b) Сравнение смоделированных 2D-распределений δN<sub>e</sub> (row 1); 2D-распределений фазы сигнала на земле (row 2); 1D - развертка во времени изменения фазы сигнала (row 3); (c) Сравнение зависимости распределений PSD (power spectral density) спектральной мощности фазы сигнала GPS на станции Resolute Bay (красный цвет) и фазы, смоделированной с помощью GEMINI-SIGMA (синий цвет) от частоты в Гц. (d) Вверху сравнение зависимостей наблюдаемой (зеленый цвет) и смоделированной (синий цвет) спектральной мощности сигнала (в Дб) от времени (в сек); внизу сравнение временной развертки, наблюдавшейся на станции ResoluteBay (зеленый) и смоделированной фазы (в Рад) (синий) от времени (в сек).

35

![](_page_33_Figure_1.jpeg)

(a)  $O \sigma_{\phi} > 0.5 \text{ (rad)}$   $O \sigma_{\phi} 0.25 < 0.5 \text{ (rad)}$   $\sigma_{\phi} < 0.25 \text{ (rad)}$  G - GPS, R- GLONASS

Рис. 16. (а1-а4) Карты GPS TEC для четырех моментов: 09.42; 09.47; 09.52 и 09.57 UT 30.11.2014 с использованием данных из базы данных Madrigal с индексами фазовых мерцаний, полученными с четырех приемников на Свальбарде. Уровень фазовых мерцаний отображен в виде черных точек для низких фазовых сцинтилляций (<0,25 рад), средних кружков для средних значений сцинтилляций (0,25 ≤ <0,5 рад) и больших кружков для сильных сцинтилляций (≥ 0,5 рад). Цветные числа выделяют конкретные выбранные PRN GPS и GLONASS, отслеживаемых приемником в Ny-Alesund. Буква «R» обозначает GLONASS, а «G» - GPS. Сплошная веерообразная линия показывает поле зрения ESR, а пунктирный овал на (a1) выделяет объем повышенной плотности. Панели с (b) по (m) показывают временные ряды vTEC (b, c, d), |ROT| (e, f, g), индекс амплитудных сцинтилляций S4 (h, i, j) и индекс фазовых сцинтилляций σ<sub>Φ</sub> (k, l, m) для выбранных сигналов

конкретных PRN между 09:37 UT и 10:00 UT.

Adapted from Spicher et al., 2020

![](_page_34_Figure_1.jpeg)

Рис. 17. панель (А) иллюстрирует данные полученные 30.11.2014 с орбиты КА DMSPF17: на верхней панели (а) концентрация ионов, на средней панели (b) скорость ионов, а на нижней (c) средняя энергия высыпающихся электронов. На панели (B) слева направо приведены три карты, построенных по данным радара в Свальбарде для интервала времени, выделенного на панели (А) сиреневым прямоугольником: Ne (vTEC), скорости ионов Vi, и температуры электронов Те. Кружками разных диаметров на них нанесены индексы фазовых сцинтилляций σφ. На все три карты нанесена проекция орбиты КА DMSPF17, сиреневыми ромбиками помечены моменты времени от 09.49 до 09.51. На нижней панели (С) показаны результаты моделирования GEMINI+SIGMA.

Комментарий. (SIGMA = Satellite-beacon Ionospheric-scintillation Global Model of the upper Atmosphere; GEMINI = Geospace Environment Model of Ion-Neutral Interactions; GNSS = Global Navigation Satellite Systems). В [Deshpande et al., 2016] использовался метод обратного моделирования, чтобы подогнать выходные данные SIGMA к наблюдениям и получить оптимальные значения входных параметров SIGMA для наилучшего соответствия. Чтобы достигнуть наилучшего соответствия смоделированных данных и данных наблюдений использовался критерий наименьших квадратов или критерий хи-квадрат [Press et al. 1992]. Метрика  $\chi^2$  (рис. 15с) минимизировалась для каждой симуляции SIGMA, запускаемой на 4D однородной сетке, где SIGMA запускалась с набором различных значений для четырех проектных переменных.

Для анализа использовались данные, которые уже были приведены на рис. 1 (пример одновременных измерений GNSS сцинтилляций на шести станциях: (трех в северном полушарии (Ny-Alesund (NY0), Tromso, and Resolute Bay (ResBay) и трех в южном полушарии (McMurdo (MCM), South Pole (SPA), and Concordia (DMC0)), (см. табл.1 с координатами), полученных в период активных бурь и суббурь 9 марта 2012 г. с использованием данных [Deshpande et al., 2016]. Также использовались результаты измерений, проведенных сетью радаров Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN) и радаром некогерентного рассеяния (ISR), побудивший авторов [Deshpande et al., 2016] выбрать интервал от 3 до 4 UT 09.03.2012. В это время было начало геомагнитной бури, сопутствующие условия показаны на панели справа рис 1. В указанном интервале наблюдались почти непрерывные фазовые сцинтилляции длительностью более 30 с на большинстве приемников. Это фактор был важен для последующего обратного моделирования, т. к. было необходимо иметь не менее 30 секунд непрерывных сцинтилляций для сравнения со смоделированными фазовыми временными рядами той же продолжительности. В течение рассматриваемого интервала авторы наблюдали колебания мощности PSD (power spectral density) (см. рис. 16), превышающие минимальный уровень шума в высокоскоростных данных GPS в любом месте. Минимальный уровень фонового шума в периоды отсутствия сцинтилляций в интервале от 3 до 4 UT 9 марта 2012 г. для каждой из выбранных локаций приемников был на уровне ~± 2 дБ. Все высокоскоростные 50 Гц данные фазовых сцинтилляций GPS на шести станциях в выбранном интервале, показанные на рис. 1, были детрендированны и отфильтрованы. Широта показана на вертикальной оси. Данные сцинтилляций, обведенные черными прямоугольниками, указывают периоды сцинтилляций, из которых авторы получали выбранные 30секундные данные GPS, используемые в задачах обратного моделирования [Deshpande and Zettergen, 2019]. Шкала, показанная в правой части графика, соответствует величине фазы 3 рад. В течение рассмотренного периода суббури 09.03.2012 не наблюдались никаких сцинтилляций на станции Конкордия (Concordia), которая близка к геомагнитному Южному полюсу. Этот факт помог определить динамику ионосферной структуры в контексте геомагнитного расположения. В анализе были использованы данные Канадской ионосферной сети (CHAIN Canadian High Arctic Ionospheric Network), данные GPS сцинтилляций на станции Resolute Bay [Jayachandran et al., 2009], и

Ionospheric Network), данные GPS сцинтилляций на станции Resolute Bay [Jayachandran et al., 2009], и графики условий OVATION Prime на основе данных КА POES [Newell et al., 2009, 2014; Machol et al., 2012].

# **5.2** Наблюдения и моделирование сцинтилляций сигналов GPS и GLONASS в окрестности каспа с наблюдавшейся повышенной Ne во время сдвигов потоков плазмы **30.11.2014** в условиях суббури [Spicher et al., 2020].

30 ноября 2014 г. в интервале 09.42-09.57 UT на Шпицбергене в [Spicher et al., 2020] проведено мульти-инструментальное многомасштабное исследование канала усиленного неоднородного потока в ионосфере в окрестности северного каспа. Самые сильные фазовые сцинтилляции происходили на приполюсной стороне потокового канала в области сдвигового движения плазмы и структурированных высыпаний частиц низких энергий. Была использована частота L1 для измерений сцинтилляций и двойные частоты для TEC (L1 и L2Y для GPS, L1 и L2P для GLONASS). Спутник Galileo не отслеживался в течение интересующего интервала времени. Во время этого события EISCAT Svalbard Radar находился вблизи 12 MLT. Между 09:36 и 09:42 UT после полудня на отметке 13 MLT был обнаружен крупномасштабный поток плазмы на севере от Свальбарда, который был направлен на югозапад рис. 16(1a). Этот поток полностью изменил направление между 09:42 UT и 09:48 UT. Как показано на рис. 16(1b), крупномасштабное движение плазмы в основном стало направлено к полюсу. Между 09:48 UT и 09:54 UT поток к полюсу (северо-восток), показанный на (1c), значительно усилился

и, в поле зрения радара ESR и его скорость достигла значений около 1000 м/с к северу от Свальбарда (не показано). В 09.42 UT уровень фазовых сцинтилляций был низким. На рисунке 16 (a2) карта TEC осталась почти такой же с небольшим движением к полюсу объема повышенной плотности  $N_{\rm e}$ , увеличенные индексы фазовых сцинтилляций появились вблизи области повышенной плотности на высоких широтах. На панелях (a3) и (a4) значения индекса  $\sigma_{\phi} \ge 0.5$  рад сохранялись в той же области, в течение которых отчетливое движение к полюсу наблюдалось в области повышенной плотности. В итоге в поле зрения ESR электронная плотность была низкой, но индекс  $\sigma_{\phi}$  оставался повышенным.

Проведен количественный, нелинейный анализ неустойчивости Кельвина Гельмгольца КНІ (Kelvin–Helmholtz Instability) с использованием численного моделирования GEMINI-SIGMA в [Spicher et al., 2020]. Были использованы типичные зимние условия и начальная конфигурация, подобную тем, что приводит к наиболее сильным фазовым вариациям, то есть области плазмы с высокой и низкой плотностью, разделенные сдвиговым потоком плазмы, как показано на рис. 16 (al и a2). Такое моделирование потребовало больших вычислительных ресурсов (несколько дней с сотнями процессоров), поэтому был использован подход к моделированию с представленными значениями для рассматриваемого события в каспе 30.11.2014 г., а не перебора всех разумных комбинаций входных параметров. Это моделирование не параметрическое исследование, а скорее демонстрация осуществимости КНІ в качестве агента для создания сцинтилляций в аналогичных ситуациях.

На трех верхних панелях A [(a), (b) и (c)] рис. 17 показаны развертки во времени измерений Ni, Vi и средней энергии электронов Eav соответственно, проведенных с орбиты KA DMSPF17 в интервале 09.47-09.53 UT, который пересек область каспа в 09.50-09.51 UT. Проекция орбиты нанесена на три последовательных панели (B), отображающих пространственную развертку измерений  $N_e$ +VTEC, Vi и  $T_e$  слева направо соответственно, проведенных радаром в Свальбарде. Повышенная температура электронов на правой панели рис. 17(B) показывает отклик на высыпания частиц в каспе. На нижней панели (C) слева направо показаны четыре вертикальных пары последовательных во времени изображений смоделированной 2D-плотности Ne (верхний ряд) из GEMINI, и 2D-фазы в радианах на высоте максимума слоя F2 (средний ряд), спроектированной до Земли через SIGMA, показывающие фазовые сцинтилляции сигналов GPS на разных стадиях во время «работы» неустойчивости KHI в близких условиях к рассмотренной ситуации 30.11.2014. Внизу показаны 1D-развертки сцинтилляций фазы в интервалах времени: с 540 по 660 сек, и с 960 по 1080 сек.

Комментарий. События RFE (reversed flow event) считаются следствиями событий переноса потока FTE (flux transfer event) (Southwood, 1987) и связаны с повышением яркости дуг и усилением продольного тока [Moen et al., 2008; Oksavik et al., 2004,2005]. Наблюдались неоднородности плотности декаметрового масштаба по отношению к RFE, и было предложено, что неустойчивость KHI на микромасштабах может быть ответственной за их создание (например, Carlson et al., 2007; Oksavik et al., 2011; Spicher et al., 2016]. Поэтому RFE являются каспенными явлениями, которые особенно интересны в рамках космической погоды и неустойчивостей при сдвигах потока. [Моеn et al., 2013].

### 5.3 Мини-резюме, стратегия и тактика моделирования сцинтилляций с использованием моделей GEMINI и SIGMA

Мини-резюме: В 5.1 и 5.2 были показаны результаты моделирования при изучении влияния неустойчивости GDI (gradient-drift instability) на сигналы навигационной системы GPS, пересекающие дрейфующее пятно в полярной шапке с увеличенной Ne [Deshpande & Zettergren, 2019], а в 5.2. как первичный механизм генерации сцинтилляций сигналов GPS рассмотрена неустойчивость KHI, генерируемая при неоднородных потоках плазмы вблизи границы между слоем увеличенной плотности в каспе и соседней областью уменьшенной  $N_e$ . С помощью GEMINI-SIGMA выполнено численное моделирование KHI и более детальное исследование вероятности возникновения неоднородностей плотности Ne и связанных с ними фазовых сцинтилляций сигналов в области каспа. В работах [Chartier et al., 2016], [Deshpande and Zettergren, 2019] и [Spicher et al, 2020] впервые были использованы в комплексе основанная на физических принципах модель ионосферы и трехмерная модель распространения электромагнитных волн для получения количественной информации о неоднородностях в плазме и сцинтилляциях в полярной ионосфере. Были представлены оптимистичные результаты сравнения с результатами наблюдений:

1) 09.03.2012 г. со станции Resolute Bay (см. рис. 12), над которой дрейфовало пятно с повышенной Ne во время геомагнитной суббури, и результатов расчетов на основе комбинации двух моделей Geospace Environment Model of Ion-Neutral Interactions (GEMINI) и Satellite-beacon Ionospheric-

scintillation Global Model of the upper Atmosphere (SIGMAIII) на основе данных сцинтилляций трансполярных сигналов GPS. В [Deshpande and Zettergren, 2019] была сделана попытка изучения влияния GDI на неоднородности ионосферы при наличии пятна полярной шапки и выяснение влияния на навигационные сигналы, принимаемые на земле. Была выбрана область над локацией станции Resolute Bay, где с помощью модели плазмы GEMINI была сгенерирована GDI, и далее было смоделировано распространение сигнала GPS L1 через ионосферные структуры с использованием полной трехмерной модели прямого распространения SIGMA. Затем сравнивались результаты наблюдений сцинтилляций над Resolute Bay. Исследования показали, что GDI в конкретных условиях преобладает в регионах полярной шапки, и приводит к сцинтилляции сигналов GPS с характеристиками очень близкими к наблюдаемым.

2) мульти-инструментальное, включая измерения характеристик плазмы с орбиты KA DMSPF17, многомасштабное исследование канала усиленного неоднородного потока в ионосфере области каспа в районе о. Шпицбереген, происходившего 30 ноября 2014 г. Были представлены доказательства того, что высокие значения индексов фазовых сцинтилляций Глобальных навигационных спутниковых систем GPS и GLONASS ( $\sigma_{\phi} > 0,5$  рад) могут возникать в результате таких событий (рис. 16). Т.к. неоднородные плазменные потоки в каспе были очевидны в наблюдениях, был применен нелинейный анализ неустойчивости Кельвина – Гельмгольца (KHI Kelvin–Helmholtz instability) и ее влияния на фазовые сцинтилляции с использованием численного моделирования (рис. 17С).

Как это происходило: В модель SIGMA, включалось пространственное распределение электронной плотности из спектральной модели неоднородностей или самой плотности из модели плазмы (GEMINI), оно транслировалось на фазовые экраны, а затем сигнал распространялся между несколькими фазовыми экранами и Землей (см. рис. 15а). Для исследования влияния эффектов рассеяния, интерференции, отражения и дифракции радиосигнала в течение распространения в случайной среде использовался гибридный метод, комбинирующий в себе несколько методов фазовых экранов с раздельным решением уравнения прямого распространения [Rino and Carrano, 2011]. В результате из SIGMA выводился двумерный сигнал, распространяющийся к Земле, а также высокочастотные временные ряды сцинтилляций фазы и мощности с частотой дискретизации 50 Гц, из которых извлекались индексы сцинтилляций S4 и  $\sigma_{\phi}$ . Тренд высокоскоростной фазы устранялся, чтобы исключить любые низкочастотные эффекты, включая движение спутника [Van Dierendonck et al., 1993]. Далее моделировалось влияние ряда механизмов в полярной шапке и авроральных областях на сцинтилляции, а именно: градиентов Ne по краям пятен полярной шапки (1) и сдвигов скорости вблизи каспа (2). Распределения электронной плотности, имели гауссово распределение вдоль силовой линии и степенной закон изменения в плоскости, перпендикулярной полю. Моделирование, представленное в этой статье, использует сетку размером  $64 \times 1,024 \times 1,536$ , покрывающую область: -153,6 ≤ х ≤ 153,6 км, -100 ≤ у ≤ 100 км, и 90 ≤ z ≤ 1000 км с разрешением 200 м. Поле центрировалось вокруг высоты максимального слоя F2 (h<sub>m</sub>F<sub>2</sub>), которая определялась в начальных условиях GEMINI с использованием среднего профиля по всей области. Фазовые экраны в SIGMA были расположены на этой высоте.

Близкое соответствие смоделированных и наблюдаемых спектральных и мульти-масштабных данных, дает основание использовать подобную физическую платформу для понимания и прогнозирования влияния ионосферных неустойчивостей на характеристики неоднородностей и качество навигации и связи. Результаты моделирования показали базовое согласие с наблюдениями в отношении масштабных размеров и strength ионосферных структур, что открывает перспективу для дальнейшего изучения причин сцинтилляций. Такой современный инструмент позволяет потенциально охарактеризовать сцинтилляции, возникающие в результате различных типов неустойчивостей и развивающиеся во времени под действием различных типов механизмов воздействий в ионосфере. 6. МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНЫХ КООРДИНИРОВАННЫХ РАЗНОМАСШТАБНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМЫ, ВКЛЮЧАЯ ПРОДОЛЬНЫЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОПЕРЕЧНЫЕ токи. ГРАДИЕНТЫ поля. РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСЫПАЮЩИХСЯ ЧАСТИЦ И СТРУКТУР АВРОРАЛЬНЫХ ЭМИССИЙ: С РАЗНЫХ ОРБИТ КА, РАЗНОВЫСОТНЫХ ТРАЕКТОРИЙ ПЛАТФОРМ ЗОНДИРУЮЩИХ РАКЕТ, САМОЛЕТОВ И БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ВЫШЕ ОБЛАКОВ. И С ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ – **OCHOBA** ЛЛЯ СОЗЛАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНОЙ СИСТЕМЫ **КОНТРОЛЯ** ПРОЦЕССОВ, ПРИВОДЯЩИХ К СТРУКТУРИРОВАНИЮ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ Ne И ПРИЧИН СЦИНТИЛЛЯЦИЙ ТРАНСПОЛЯРНЫХ СИГНАЛОВ В ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЕ

Как уже упоминалось, в [Кузьмин и др., 2019-2] была представлена функциональная блок-схема перспективной системы контроля и оценки состояния фактической фоновой спектральной и электродинамической обстановки Е- и F-слоя полярной ионосферы в глобальном и локальных масштабах по орбитальным, ракетным, самолетным (включая БПЛА) и наземным данным, полученным в России. Все потоки экспериментальных данных и результаты модельной поддержки должны собираться на целевом сервере ИКИ РАН. Условно показано рабочее место оператора, оценивающего состояние характеристик космической погоды в северной полярной зоне. Комплексность мульти-масштабной методики наблюдений заключается в одновременном использовании средств измерений на разных высотных этажах ионосферы и магнитосферы, включающих орбитальные (глобальные и локальные); зондирующие ракетные (локальные с разновысотных платформ), трассовые оптических и др. наблюдений), диагностические радарные наблюдения; и сеть приемников навигационных систем Глонасс и GPS.

В параграфах 5.1. и 5.2. мы рассмотрели конкретные примеры экспериментальных результатов, полученных в полярной шапке при наблюдениях неоднородностей плотности плазмы в F-слое и их влияния на генерацию сцинтилляций орбитальных систем навигации во время геомагнитных возмущений. В этих экспериментах использовались комплексные наблюдения с орбит KA, наблюдения радарными средствами и наземными приборами. А в других наших работах [Кузьмин и Мерзлый, 2019-1; Кузьмин и др., 2019-2] были показаны примеры наблюдений характеристик ионосферы и сцинтилляций сигналов в E-области полярной ионосферы. Отметим также факт, что за последнее десятилетие значительно увеличилось количество локальных запусков зондирующих ракет как в северной Америке, так и в скандинавских странах, координированных с наблюдениями орбитальными и наземными средствами (при пролетах KA на районами запусков зондирующих ракет) [Cohen et al. 2020; Lynch et al., 2015; Fritz et al., 2019; Lessard et al., 2019; Mella et al., 2011]. Одна из причин этого развития возникла из-за того, что высотная область полярной ионосферы, в которой замыкаются продольные токи, практически не доступна для измерений характеристик плазмы с орбитальных аппаратов. В этой области происходят локальные процессы, влияющие на генерацию неоднородностей  $N_e$ , вызывающих сцинтилляции трансполярных сигналов.

Для примера рассмотрим рис. 18, на котором показана динамика структуры неоднородностей электронной плотности в плазме ионосферы, измеренных 11 ноября 1981 г. радаром некогерентного рассеяния в Chatanika (Аляска) на четырех панелях (a, b, c, d), расположенных друг над другом для четырех интервалов времени: 04.42.33-04.57.16 UT; 05.29.36-05.44.19 UT; 05.53.08-06.07.51 UT; 06.16.40-06.31.23 UT). Контуры Ne нанесены как функции высоты и расстояния в направлении геомагнитный север-юг от радара в единицах 100 км (~0,9° широты). Они показывают (слева направо по возрастанию широты) фоновую концентрацию (слева), произведенную солнечным светом в F-слое, маркированные стрелками главный ионосферный провал концентрации, пограничный блоб (сгусток), авроральный блоб, и авроральный E-слой (справа) [Tsunoda, 1988].

На рисунке 19 (панель (е)) представлены спектрограммы потока энергии высыпающихся электронов и ионов, полученные с орбиты КА DMSPF16 (SSJ5) при пересечении вечернего аврорального овала 29.05.2010 г. в течение шести минут 13.07–13.13 UT в условиях максимальной фазы мощной суббури 29.05.2010 г. На панели (d) показан наложенный на карту в координатах геомагнитная широта - MLT профиль тотального потока энергии в mW/m<sup>2</sup>. На панели (a) показано изображение интенсивности ВУФ спектральных полос эмиссии N<sub>2</sub> LBH*l* ( $\lambda\lambda$ 165–180 нм), полученное изображающим спектрографом SSUSI, а на панели (b) – это же изображение в увеличенном масштабе.

На панелях (f) и (g) показаны изображения потока энергии высыпающихся электронов Fe и максимума электронной концентрации NmE Е-области ионосферы. Они были рассчитаны по методике, детали которой рассмотрены в [Knight, 2021]. Поток энергии электронов Fe прямо пропорционален интенсивности эмиссии LBHI [Strickland et al., 1983, 1993; Germany et al., 1994]. Функциональная связь NmE, HmE (высота максимума электронной концентрации в Е-области) с отношением интенсивностей эмиссии ILBHs/ILBHI отчасти иллюстрируется на рис. 19а. Распределение интенсивности LBHs, также полученное с помощью спектрометра SSUSI не показано на рис 19. На панелях (h) и (i) рис.19 смоделированная /GLOWcon 3D-model (GLobal AirglOW) [McGranaghan et al., 2014])/ развертка высотных профилей проводимостей (height resolved) Педерсена и Холла, вдоль траектории орбиты DMSP F16. Вверху на панели (с) показаны значения AE, AL и Dst индексов 29.05-31.05.2010 г., где красной вертикальной чертой отмечен интервал 13.07-13.13 UT. Стоит заострить внимание, что в интервале с 13.10 по 13.12 UT смоделированные проводимости имеют структуру, примерно соответствующую структуре высыпаний электронов, но по высоте структура проводимостей почти не разрешается. После 13.12 UT высыпания электронов становятся более «мягкими» по энергии, и вертикальная структура расплывается. Роль ионосферной проводимости и продольных токов в процессах рассеивания и распределения энергии, поступающей из магнитосферы [Kamide et al., 1996], показана на нижней панели рис. 19, адаптированной из [McGranaghan et al., 2016-2]. Мы привели этот пример для того, чтобы проиллюстрировать, что высотная структура внутри слоев проводимостей  $\sigma_n$ и  $\sigma_b$ , смоделированных в [McGranaghan et al., 2016-1], не разрешается. Как следствие, понятно, что получать реальную информацию можно только прямыми измерениями внутри слоев, и поэтому необходимо продолжить развитие технологии локальных одновременных измерений характеристик с малых платформ, отделяемых от зондирующих ракет на разных высотах, проводимых в рамках одновременных комплексных измерений.

На рисунке 20 мы представляем конкретный вариант перспективных системных локальных наблюдений характеристик полярной ионосферы в конкретной области (вблизи пос. Тикси в республике Саха (Якутия), при этом подразумевается, что: а) одновременные глобальные крупномасштабные наблюдения за состоянием северного аврорального овала будут осуществляться с помощью аврорального имаджера Авровизор-ВУФ (не показан на рисунке), установленном на перспективном КА Арктика-МП на орбите типа Молния, характеристики которой аналогичны орбите работающего в настоящее время КА Арктика-М. Оптические схемы и внешний облик изображающей ВУФ-камеры и изображающего спектрометра, разрабатываемых для этого проекта, были показаны в [Кузьмин и Мерзлый., 2014]; б) локальные наблюдения авроральных эмиссий ( $\lambda 630,0$  нм и  $\lambda 427,8$  нм) будут проводиться с помощью двухканального аврорального имаджера «Летиция» с орбиты перспективного КА Зонд (программа «Геофизика»), более детально см. рис. 12 в [Кузьмин и др., 2019-2]. Наземные наблюдения авроральных эмиссий осуществляются с различных точек в разных секторах MLT полярной зоны территории России с помощью автоматических All-Sky камер, расположение которых, включая перспективные, показано на карте (нижняя панель рис. 22) а на верхней панели для сравнения показаны зоны наблюдений авроральных эмиссий All-sky камер, расположенных на Аляске и в Канаде; в) локальные (секторные) радарные наблюдения высотных распределений  $N_{c}$ ; г) локальные наблюдения характеристик плазмы (продольные и поперечные токи, электрическое поле, распределение высыпающихся заряженных частиц, Ne и Te) с двух мини-платформ, отделяемых на разных высотах от зондирующей ракеты, запущенной с полигона в пос. Тикси (рис. 20). Один из вариантов геометрии ракетного эксперимента показан на рис. 21. Конкретная дата и время старта ракеты и отделения платформ будет рассчитываться и выбираться в соответствии прогнозными расчетами пролета КА Зонд над зоной пос. Тикси с помощью ПО Вектор-М [Баньщикова и др., 2012,2020] (или его аналога), а также прогнозом геомагнитной активности и прогнозом погоды в период с сентября по март.

<sup>©</sup> Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

![](_page_40_Figure_1.jpeg)

Рис.18. Динамика структуры неоднородностей *N*<sub>e</sub>, измеренная 11.11.1981 г. с помощью некогерентного радара обратного рассеяния в Chatanika (Аляска), см. текст.

![](_page_41_Figure_1.jpeg)

Рис. 19. Пример измерений потоков энергии высыпающихся заряженных частиц с орбиты КА DMSPF16 в вечернем авроральном овале в условиях максимальной фазы суббури 29.05.2010 в интервале шести минут 13.07. – 13.13. UT, и смоделированных в [McGranaghan et al., 2014] распределений (модель GLOWcon) высотных профилей поперечных проводимостей σ<sub>p</sub> и σ<sub>h</sub>.

![](_page_42_Figure_1.jpeg)

Рис. 19а. Смоделированная функциональная связь NmE, HmE, средней энергии E<sub>0</sub> высыпающихся электронов (Гауссовское распределение) и протонов (Каппа-распределение) с отношением интенсивностей I<sub>LBHs</sub>/I<sub>LBHI</sub> в условиях потока энергии частиц 1 эрг/см<sup>2</sup>сек в авроральной структуре [Knight, 2021].

![](_page_43_Figure_1.jpeg)

Рис. 20. Геометрия перспективных комплексных локальных наблюдений характеристик полярной ионосферы в окрестности пос. Тикси (Якутия) во время геомагнитных возмущений, включая:
1. Наземные наблюдения авроральных эмиссий и радарные наблюдения скорости конвекции и концентрации плазмы; 2. Наблюдения авроральных эмиссий на трассах БПЛА (беспилотные летательные аппараты) или самолета; 3. Наблюдения потоков высыпающихся электронов, характеристик плазмы Ne и Te, электрического поля, продольных и поперечных токов с траекторий двух мини-платформ, отделяемых от зондирующей ракеты на разных высотах; 4. Координированные (с измерениями с разновысотных платформ, запущенных зондирующей ракетой) наблюдения авроральных эмиссий (с помощью двухканального имаджера Летиция) с орбиты перспективного КА Зонд (программа Геофизика)

![](_page_44_Figure_1.jpeg)

Рис. 21. Пример одного из вариантов геометрии запуска и характеристик траектории зондирующей ракеты, запускаемой со Станции Ракетного Зондирования Атмосферы (СРЗА) Тикси, во время выбранных конкретных геофизических условий

![](_page_45_Figure_1.jpeg)

Рис. 22. Условное взаиморасположение полей наблюдения (на высоте 200 км) в полярных широтах Российской сети автоматических All-sky камер, включая перспективные, на географической карте (нижняя панель). На верхней панели сеть автоматических All-sky камер в Канаде и на Аляске, используемой в качестве наземной поддержки, в орбитальном проекте THEMIS и др. (геомагнитные координаты), а также расположения секторов наблюдений скорости конвекции в полярной ионосфере сетью радаров SupeDARN (SuperDualAuroralRadarNetwork) and CHAIN (Canadian High Arctic Ionospheric Network)

[Jayachandran et al., 2009].

#### 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. С ростом активности России в Арктике прогресс в выявлении конкретных локаций ионосферных неоднородностей и понимании физических процессов, которые их создают (в пределах масштабов от нескольких декаметров до нескольких десятков километров), приобретает все большее значение для решения научных и прикладных задач. Обширный обзор авроральных структур, их масштабов, возможных мест их генерации в полярной зоне, включая полярную шапку, позволяет приблизиться к пониманию механизмов генерации неоднородностей в полярной ионосфере в различных условиях, и начать развитие методики исследований процессов, влияющих на характеристики распространения трансполярных сигналов.

2. Рассмотрен ряд новых результатов, полученных в зарубежных комплексных экспериментах, и их методик, нацеленных на исследования характеристик ионосферы в полярной шапке, включая касп.

<sup>©</sup> Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

Эти результаты показывают, что среда полярной ионосферы существенно влияет на условия распространения сигналов орбитальных навигационных систем, включая GPS и GLONASS, и особенно в геомагнитно-возмущенных условиях.

3. Строится основа перспективных комплексных локальных наблюдений электродинамических характеристик полярной ионосферы, включая высыпания заряженных частиц, продольные токи, поперечные токи замыкания, электрическое поле, концентрации и температуры с мини-платформ, отделяемых от зондирующей ракеты на разных высотах, с координированными наблюдениями авроральных эмиссий с орбиты перспективного КА Зонд, и наземным оптическим и радарным комплексами диагностики характеристик плазмы ионосферы в зоне станции пос. Тикси (Якутия). Предполагается, что в этот же период будет работать авроральный ВУФ-имаджер на орбите перспективного КА Арктика-МП, позволяющий получать каждую минуту изображения всего аврорального овала, включая его освещенную часть, с разрешением ~70×70 км/пиксель.

4. На двух конкретных примерах использования тандема моделей GEMINI-SIGMA (см. текст п.4), развитого в [Deshpande et al., 2016 и Deshpande and Zettergen, 2019] и [Spicher et al., 2020] в полярной шапке показано как полная модель генерации процесса неоднородностей плазмы в ионосфере может влиять на характеристики распространение сигналов орбитальных навигационных систем в полярной ионосфере. Этот современный инструмент позволил характеризовать сцинтилляции, генерируемые в результате различных типов неустойчивостей (GDI и KHL) и их эволюцию во времени. Компонент GEMINI обеспечил возможность моделировать эволюцию изначально устойчивой ионосферной плазмы в нестабильной конфигурации из-за магнитосферного воздействия (включая высыпания электронов и генерацию электрических полей). Эта способность обеспечила возможность выяснения типа неустойчивостей, которые могут возникать в различных геофизических ситуациях (например, в каспе, полярной шапке и при высыпаниях авроральных частиц). При сравнении с наблюдениями устранялись неоднозначности наблюдений, которые препятствовали окончательному выяснению динамики характеристик ионосферы, ведущей к сцинтилляциям в высокоширотных областях. Близкое соответствие смоделированных и наблюдаемых спектральных и мульти-масштабных данных, дает основание использовать подобную физическую платформу для понимания и прогнозирования влияния ионосферных неустойчивостей на характеристики неоднородностей и качество навигации и связи.

**Резюме**: Многообразные мульти-масштабные процессы в различных секторах MLT полярной ионосферы детально объяснены еще далеко не все, и поэтому до сих пор не прогнозируются, хотя со временем все больше накапливается результатов измерений и статистических данных об их характеристиках, полученных в различных условиях. Для решения прикладных и исследовательских научных задач в полярной ионосфере требуется дальнейшее развитие экспериментальной базы для мониторинга характеристик полярной ионосферы, и комплексных моделей, включающих неустойчивости, генерируемые в плазме полярной ионосферы, позволяющих получать реальные данные о процессах в полярной зоне и проведение анализа неоднородностей плазмы в конкретных секторах MLT в конкретных условиях с целью количественного описания результирующих сцинтилляционных характеристик трансполярных сигналов, и, в конечном счете, краткосрочного прогнозирования условий распространения в различных секторах MLT полярной шапки и аврорального овала.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Баньщикова М.А., Чувашов И.Н., Кузьмин А.К. Прикладная программная система «Вектор-М» для расчета сопутствующей геофизической и астрономической информации для пространства наблюдений в эксперименте «Авровизор-ВИС/МП» на КА «Метеор-МП» // Известия вузов. Физика. М.: ФГАОУВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет». №10/2. С.106-111. 2012.http://www.cosmic-rays.ru/ articles/13/201201.pdf.
- Баньщикова М.А., Авдюшев В.А., Кузьмин А.К., Методика проведения космического эксперимента с авроральными имаджерами на спутниковых орбитах // Космические исследования, Т.58, № 5, С.1–8, 2020.
- Израйлевич П.Л., Кузьмин А.К., Излучение ионов О<sup>+</sup>(<sup>2</sup>P) в трансполярных дугах, Космич. Исслед., Т.XXVII, вып.5, С. 699-702, 1989.

- Кузьмин А.К. и Мерзлый А.М., Перспективный эксперимент по контролю состояния ионосферы Земли с помощью оптического комплекса «Авровизор-ВУФ» в составе группировок высокоапогейных и низкоорбитальных космических аппаратов // Вопросы электромеханики. Т.143. №6. С.19-28. 2014.
- Кузьмин А.К., Мерзлый А.М., Баньщикова М.А., Чувашов И.Н., Крученицкий Г.М., Потанин Ю.Н., Моисеев П.П. Прикладные аспекты измерений авроральных эмиссий и характеристик полярной ионосферы имаджером «Авровизор-ВИС/МП» на перспективном КА «Метеор-МП» // Труды ВНИИЭМ, приложение за 2016 г., материалы 4-ой международной конференции «Актуальные проблемы создания космических систем Д33, С.325-341, 2016.
- Кузьмин А.К., Баньщикова М.А., Чувашов И.Н., Крученицкий Г.М., Потанин Ю.Н., Преимущества наблюдений авроральных структур с двух орбит и возможности для реконструкций 3D-распределений эмиссий, получаемых с разных позиций имаджеров // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ, том 158, №3, С. 7-21, 2017.
- Кузьмин А.К., Мерзлый А.М. Дистанционная оптическая диагностика состояния полярной ионосферы в различных диапазонах спектра на основе данных наблюдений орбитального аврорального имаджинга. Часть 1 (ВУФ-диапазон) // Вопросы электромеханики. Т.167. №6. С.9-41. 2018.<u>http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/201805.pdf.</u>
- 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) // Вопросы электромеханики. Т.168. №1. С.19-42. 2019-1. <a href="http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/201901.pdf">http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/201901.pdf</a>.
- Кузьмин А.К., Вайсберг О.Л., Мерзлый А.М., Петрукович А.А., Крученицкий Г.М., Баньщикова М.А., Орбитальная оптическая авроральная диагностика состояния полярной ионосферы, как часть системного контроля космической погоды // Гелиогеофизические исследования, Вып. 24, С.35-60, 2019-2.
- Старков Г.В., Планетарная динамика аврорального свечения, ч.1 // Сб. ПГИ "Физика околоземного космического пространства", ч.1 и 2, Апатиты, 2000,
- Фельдштейн Я.И., Воробьев В.Г., Зверев В.Л., Планетарные закономерности полярных сияний. Итоги МГГ: Обзор // Геомагнетизм и аэрономия, т.50, № 4, С. 435–458, 2010.
- Хорошева О.В., Связь геомагнитных возмущений с динамикой магнитосферы и параметрами межпланетной среды // Геомагнетизм и аэрономия, т.47, №5, С.579–583, 2007.
- Aarons J., Lin B., Mendillo M., Liou K., Codrescu M. Global Positioning System phase fluctuations and ultraviolet images from the Polar satellite // Journ. Geophys. Res., V.105, No. A3, Pp.5201-5213, 2000.
- Akasofu S.-I., Several "controversial" issues of substorms // Space Sci Rev. 2004, V.113, Pp. 1-40.
- Anderson D.N., Decker D.T., Valladares C.E., Modeling boundary blobs using time varying convection // Geophys. Res. Lett., V. 23, №5, Pp. 579-582, 1996.
- Basu, Su., Basu, S., MacKenzie, E., Fougere, P. F., Coley, W. R., Maynard, N. C., Winningham, J. D., Sugiura, M., Hanson, W.B., Hoegy, W. R., Simultaneous density and electric field fluctuation spectra associated with velocity shears in the auroral oval // Journ. Geophys. Res., V.93, P.115–136, 1988.
- Basu B., Coppi B., Plasma collective modes driven by velocity gradients // Journ. Geophys. Res., V.95, issue.21, issue 12, P. 21213-21220, 1990.
- Basu S.; Basu Su. Chaturvedi P.K., Bryant C.M., Irregularity structures in the cusp/cleft and polar cap regions // Radio Sci., V.29, issue 1, P.195-207, 1994. <u>https://doi.org/10.1029/93RS01515</u>
- Basu S., Basu, Su., Sojka, J.J., Schunk, R.W., MacKenzie, E., Macroscale modeling and mesoscale observations of plasma density structures in the polar cap // Geophys. Res. Lett., V.22, P. 881-884, 1995.
- Basu S., Groves, K.M., Basu, S., Sultan, P.J. Specification and forecasting of scintillations in communication/navigation links: Current status and future plans // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, V.64, P.1745–1754, 2002.
- Booker, H.G., Ratcliffe J.A., and Shinn D.H., Diffraction from an irregular screen with applications to ionospheric problems // Phil. Trans. R. Soc. London, Ser. A, 856, P. 579-609, 1950.
- Borovsky J.E., Auroral Arc Thicknesses as Predicted by Various Theories // Journ. Geophys. Res., V.98, A4, P.6101-6138, 1993. doi: 10.1029/92JA02242

<sup>©</sup> Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

- Burrell A.G., Chisham G., Milan S.E., Kilcommons L., Chen Y.-J., Thomas E.G., Anderson B., AMPERE polar cap boundaries // Ann. Geophys., 38, P. 481–490, 2020 https://doi.org/10.5194/angeo-38-481-2020
- Cai L., Kullen A., Zhang Y., Karlsson T., Vaivads A., DMSP Observations of High-Latitude Dayside Aurora (HiLDA) // Journ. Geophys. Res.: Space Physics, V.126, P.1-27, 2021. e2020JA028808. https://doi.org/10.1029/2020JA028808
- Carlson H.C., The dark polar ionosphere: Progress and future challenges// Radio Sci., V.29, №1, P.157-165, 1994.
- Carlson H.C., Pedersen T., Basu S., Keskinen M., Moen J., Case for a new process, not mechanism, for cusp irregularity Production // Journ. Geophys. Res. Space., V.112, A11304, 2007. doi:10.1029/2007JA012384
- Carlson H.C., Oksavik K., Moen J., On a new process for cusp irregularity production // Ann. Geophys., V.26, P.2871–2885, 2008. www.ann-geophys.net/26/2871/2008/
- Carrano C.S., Groves K.M., Caton R.G., Rino C.L., Straus P.R. Multiple phase screen modeling of ionospheric scintillation along radio occultation raypaths // Radio Sci., V. 46, RS0D07, 2011. doi:10.1029/2010RS004591
- Chartier A., Forte B., Deshpande K., Bust G.S., Mitchell C., Three-dimensional modeling of high latitude scintillation observations // Radio Science, V.51, No.7., P.1022-1029, 2016. doi:10.1002/2015rs005889
- Chaston C.C., Carlson C.W., Ergun R.E., McFadden J.P., Alfven Waves, Density Cavities and Electron Acceleration Observed from the FAST Spacecraft // Physica Scripta,2000, T84, 64, P.64-68, 2000. doi:10.1238/Physica.Topical.084a00064
- Chaston C.C., Bonnel J., Carlson C.W., McFadden J.P, Ergun R.E., Strangeway R.J., Properties of small-scale Alfvén waves and accelerated electrons from FAST // Journ. Geophys. Res., V.108, A4, P.COA 4-1-4-16, 2003. doi:10.1029/2002JA009420
- Chamberlain J.W., Physics of Aurora and Airglow, V.2, Academic Press, New York and London, 704 pages., 1961.
- Cogger L., Howarth A., Yau A., White A., Enno G., Trondsen T., Asquin D., Gordon B., Marchand P., Ng D., Burley G., Lessard M., Sadler B. Fast Auroral Imager (FAI) for e-POP Mission // Space Sci. Rev., V.189., P.15– 25, 2014. doi:10.1007/s11214-014-0107-x
- Cohen I.J., Anderson B.J., Bonnell J.W., Lysak R.L., Marc R. Lessard M.R., Michell R.G., Roger H. Varney R.H., Rocket Investigation of Current Closure in the Ionosphere (RICCI): A novel application of CubeSats from a sounding rocket platform // Advances in Space Research, V.66, P. 98–106, 2020.
- Cragin B.L., Fejer J.A., Leer E., Generation of artificial spread F by a collisionally coupled purely growing parametric instability // Radio Sci., V.12, issue 2, P. 273-284, 1977.
- Crowley G, Ridley A.J., Deist D., Wing S., Knipp D.J., Emery B.A., Foster J., Heelis R., Hairston M., Reinisch B.W., Transformation of high latitude ionospheric F region patches into blobs during the March 21, 1990, storm // Journ. Geophys. Res., V.105, A3, P.5215-5230, 2000.
- Cumnock J. A. and Blomberg L. G.: Transpolar arc evolution and associated potential patterns // Ann. Geophys., V.22, P.1213–1231, 2004, http://www.ann-geophys.net/22/1213/2004/.
- Cumnock J.A., Blomberg L.G., Kullaen A., Karlsson T., Sundberg K.A.T., Small-scale characteristics of extremely high latitude aurora // Ann. Geophys., V.27, P.3335-3347, 2009.
- Dahlgren H., Aikio A., Kaila K., Ivchenko N., Lanchester B.S., Whiter D., Marklund G., Optical and radar analysis of auroral curls at high spatial resolution, Presentation (21 slides), 35 AM, 26 Aug. 2008.
- Dahlgren H., Tutorial on small scale aurora, Presentation (37 sl.), 38<sup>th</sup> Annual European meeting on atmospheric studies by optical methods, Finland, 24 Aug 2011.
- Dahlgren, H., Semeter J.L., Hosokawa K., Nicolls M.J., Butler T.W., Johnsen M.G., Shiokawa K., Heinselman C., Direct three-dimensional imaging of polar ionospheric structures with the Resolute Bay Incoherent Scatter Radar, Geophys. Res. Lett., V.39, L05104, 2012. doi:10.1029/2012GL050895.
- Deshpande, K. B., Bust, G. S., Clauer, C. R., Scales, W. A., Frissell, N. A., Ruohoniemi, J. M., Spogli L., Mitchell C., Weatherwax A.T., Satellite-beacon Ionospheric-scintillation Global Model of the upper Atmosphere (SIGMA) II: Inverse modeling with high-latitude observations to deduce irregularity physics: Scintillation model II: Inverse modeling // Journ. Geophys. Research. Space Physics, V.121, P.9188–9203, 2016. https://doi.org/10.1002/2016JA022943

- Deshpande K.B. and Zettergren M.D., Satellite-Beacon Ionospheric-Scintillation Global Model of the Upper Atmosphere (SIGMA) III: Scintillation Simulation Using A Physics-Based Plasma Model, Geophys. Res. Lett., V.46, issue. 9, Pp. 4564-4572, 2019. <u>https://doi.org/10.1029/2019GL082576</u>
- Donovan E., Mende S., Jackela B., Frey H., Syrjäsuoa M., Voronkov I., Trondsen T., Peticolas L., Angelopoulos V., Harris S., Greffen M., Connors M., The THEMIS all-sky imaging array-system design and initial results from the prototype imager // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, V.68, P.1472–1487, 2006.
- Fasel G., Dayside poleward moving auroral forms: A statistical study // Journ. Geophys. Res., V. 100, Pp. 11891-11905, doi:10.1029/95JA00854.
- *Fear R.C., Milan S.E.*, Ionospheric flows relating to transpolar arc formation, Journ. Geophys. Res., V.117, A09230, 2012. doi:10.1029/2012JA017830
- Fear R.C., Milan S.E., Carter J.A., Maggiolo R., The interaction between transpolar arcs and cusp spots // Geophys. Res. Lett., V.42, P. 9685–9693, 2015. doi:10.1002/2015GL066194
- Forsyth C., Sergeev V.A., Henderson M.G., Nishimura Y., Gallardo-Lacourt B., Physical Processes of Meso-Scale, Dynamic Auroral Forms // Space Sci. Rev., V.216, P.1-46, 2020. https://doi.org/10.1007/s11214-020-00665-y
- Forte B., Coleman Ch., Scone S., Haggstrom I., Mitchell C., Da Dalt F., Panicciari T., Kinrade J., Bust G., Identification of scintillation signatures on GPS signals originating from plasma structures detected with EISCAT incoherent scatter radar along the same line of sight // Journ. Geophys. Res. Space Phys., V.122, Pp. 916-931. doi:10.1002/2016JA023271.
- *Frank, L. A., and Sigwarth J.B.*, Findings concerning the position of substorm onsets with auroral images from the Polar spacecraft // Journ. Geophys. Res., V.105, P. 12,747–12,761, 2000.
- *Fremouw E.J., Secan J.A., Lansinger J.M.*, Spectral behavior of phase scintillation in the nighttime auroral region // Radio Science, V.20, No. 4, P. 923-933, July-August1985.
- Frey H.U., Immel T.J., Lu G., Bonnell J., Fuselier S.A., Mende S.B., Hubert B., Østgaard N., Le G., Properties of localized, high latitude, dayside aurora // Journ. Geophys. Res., V.108, No. A4, P.COA 9-1 COA 9-14, 2003. doi:10.1029/2002JA009332
- Frey H.U., Localized aurora beyond the auroral oval // Reviews of Geophysics, V.45, RG1003, P.1-32, 2007. doi:10.1029/2005RG000174
- Frey H.U., Han D., Kataoka R., Lessard M.R., Milan S.E., Nishimura Y., Strangeway R.J., Zou Y., Dayside Aurora // Space Sci Rev., 215:51, 2019. <u>https://doi.org/10.1007/s11214-019-0617-7</u>
- Friis-Christensen E., Vennerstrom S., McHenry M.A., Clauer C.R. Ionospheric traveling convection vortices observed near the polar cleft – A triggered response to sudden changes in the solar wind // Geophys. Res. Lett., V. 15, Pp. 253-256, doi:10.1029//GL015i003p00253.
- Fritz B.A., Lessard M.R., Dymond K.F., Kenward D.R., Lynch K.A., Hecht J.H., Clemmons J.H., Cook T., Chakrabarti S., Solomon S.C., RENU2 UV PMT Observations of the Cusp // Geophys. Res. Lett., V. 47, issue 20, P. 1-9, 2019. 10.1029/2019GL082314
- Gallardo-Lacourt B., Nishimura Y., Lyons L.R., Mishin E.V., Ruohoniemi J.M., Donovan E.F., Angelopoulos V., Nishitani N., Influence of Auroral Streamers on Rapid Evolution of Ionospheric SAPS Flows. Journal of Geophysical Research: Space Physics, V.122, P.12406–12420, 2017, https://doi.org/10.1002/2017JA024198
- Galperin Yu.I., Multiple scales in auroral plasmas Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 64, P. 211–229, 2002. www.elsevier.com/locate/jastp
- Geophys. Inst. Biennal Report 1993-1994 of University of Alaska Fairbanks, 244 pages, Dec 1994.
- Germany G.A., Torr M.R., Torr D.G., Richards P.G., Use of FUV auroral emissions as diagnostic indicators // Journ. Geophys. Res., V.99, A1, Pp.383-388, 1994.
- *Glassmeier K.-H., Hoenisch M., Untiedt J.,* Ground-based and satellite observations of traveling magnetospheric convection twin vortices // Journ. Geophys. Res., V. 94, Pp. 2520-2528, doi:10.1029/JA094iA03p02520.
- Golovchanskaya I.V., and Maltsev Y.P., Interchange instability in the presence of the field-aligned current: Application to the auroral arc formation // Journ. Geophys. Res., V.108, A3, 1106, SMP5-1 – SMP5-7, 2003. doi:10.1029/2002JA009505.

<sup>©</sup> Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

- Gondarenko N.A., Guzdar P.N., Plasma patch structuring by the nonlinear evolution of the gradient drift instability in the high-latitude ionosphere // Journ. Geophys. Res., V.109, A09301, 2004. doi:10.1029/2004JA010504.
- *Grimault C.*, A multiple phase screen technique for electromagnetic wave propagation through random ionospheric irregularities // Radio Sci., V.33, No.3, P. 595-605, May-June 1998.
- Greenwald R.A., Baker K.B., Dudeney J.D., Pinnock M., Jones T.B., Thomas E.C., Villain J.-P., Cerisier J.-C., Senior C., Hanuise C., Hunsucker R.D., Sofko G., Koehler J., Nielsen E., Pellinen R., Walker A.D.M., Sato N., Yamagishi H. DARN/SuperDARN: A global view of the dynamics of high-latitude convection // Space Sci Rev 71:P.761-796, 1995. <u>https://doi.org/10.1007/BF00751350</u>
- *Hallinan T.*, The distribution of vorticity in auroral arcs // In Physics of Auroral Arc Formation, ed. by S. Akasofu and J. Kan, Eds. AGU, Washington, D.C., Pp.42-49, 1981.
- Hays P.B., Rusch D.W., Roble R.G., Walker J.C.G., The OI (6300 A) Airglow // Rev. Geophys. V.16, issue 2, P.225-232, 1978.
- Henderson M.G., Morley S.K., Kepko L.E., SAPS-Associated Explosive Brightening on the Duskside: A New Type of Onset-Like Disturbance // Journ. Geophys. Res. Space Physics, V.123, P. 197–210, 2018. https://doi.org/10.1002/2017JA024472
- Hosokawa K., Shiokawa K., Otsuka Y., Ogawa T., St-Maurice J.-P., Softko G.J., Andre D.A., Relationship between polar cap patches and field-aligned irregularities as observed with an all-sky airglow imager at Resolute Bay and the PolarDARN radar at Rankin Inlet // Journ. Geophys. Res., V.114, A03306, 2009-1.
- Hosokawa K., Kashimoto T., Suzuki S., Shiokawa K., Otsuka Y., Ogawa T., Motion of polar cap patches: A statistical study with all-sky airglow imager at Resolute Bay, Canada // Journ. Geophys. Res., V.114, A04318, 2009-2.
- Hosokawa K., Moen J.I., Shiokawa K., Otsuka Y., Decay of polar cap patch // Journ. Geophys. Res., V. 116, A05306, 2011. doi:10.1029/2010JA016297
- Hosokawa K., Otsuka Y., Ogawa Y., Tsugawa T., Observations of GPS scintillation during an isolated auroral substorm // Earth and Planetary Science, V.1, 16, 2014, P.1-9, http:// www.progearthplanetsci.com/ content/1/ 1/16
- Hosokawa K., Taguchi S., Ogawa Y., Periodic creation of polar cap patches from auroral transients in the cusp // Journ. Geophys. Res. Space Physics, V.121, P.5639–5652, 2016. doi:10.1002/2015JA022221.
- Hosokawa K., Zou Y., Nishimura Y. Airglow Patches in the Polar Cap Region: A Review // Space Sci Rev, 215:53, P.1-17, 2019. https://doi.org/10.1007/s11214-019-0616-8
- Hosokawa K., Kullen A., Milan S., Reidy J., Zou Y., Frey H.U., Maggiolo R., Fear R., Aurora in the Polar Cap: A Review // Space Sci. Rev. 216:15, P.1-44, 2020. <u>https://doi.org/10.1007/s11214-020-0637-3</u>
- Hu Y.Q., Guo X.C., Wang C., On the ionospheric and reconnection potentials of the Earth: Results from global MHD simulations. J. Geophys. Res. 112, A07215 (2007).
- Huba J.D., Mitchell H.G., Keskinen M.J., Fedder J.A., Satyanarayana P., Zalesak S.T., Simulations of plasma structure evolution in the high-latitude ionosphere // Radio Sci., V.23, issue 4, 1988. doi:10.1029/88RS00115.
- Huba J.D., 1989, Theoretical and simulation methods applied to high latitude, F-region turbulence. In: C.H. Liu (ed.), "World Ionosphere/Thermosphere study", WITS Handbook, V.2, Pp.399-428, 1989, SCOSTEP Secretariat, Boulder, CO.
- Hunsuker R.D., Hargreaves J.K. The high latitude ionosphere and its effects on radio propagation // Cambridge Univ., UK, 2003, 617 P.
- Imajo S., Miyoshi Y., Kazama Y., Asamura K., Iku Shinohara I., Shiokawa K., Kasahara Y., Kasaba Y., Matsuoka A., Wang S.Y., Tam S.W.Y., Chang T.F., Wang B.J., Angelopoulos V., Jun C.W., Shoji M., Nakamura S., Kitahara M., Teramoto M., Kurita S., Hori T., Active auroral arc powered by accelerated electrons from very high altitudes // Scientific Reports, V.11:1610, P.1-8, 2021. https://doi.org/10.1038/s41598-020-79665-5
- Israelevich P.L., Kuzmin A.K., Nikolaeva N.S., Petkov N., Teltsov M.V., Observations of the intensive OII(<sup>2</sup>P) emission in the polar cap // Planet. Space Sci., v.38, No.11, P.1367-1373, 1990.
- Jayachandran P.T., Langley R.B., MacDougall J.W., Mushini S.C., Pokhotelov D., Hamza A.M., Mann R., Milling D.K., Kale Z.C., Chadwick R., Kelly T., Danskin D.W., CarranoC.S., Canadian High Arctic Ionospheric Network (CHAIN) // Radio Science, V.44, RS0A03, P.1-10, 2009. https://doi.org/10.1029/2008RS004046

- Jiao Y., Morton Y., Taylor S., Pelgrum W., Characterization of high-latitude ionospheric scintillation of GPS signals // Radio Science, V.48, P.698–708, doi:10.1002/2013RS005259, 2013
- Jin Y., Moen J.I., Miloch W.J., GPS scintillation effects associated with polar cap patches and substorm auroral activity: direct comparison // J. Space Weather Space Clim., V.4, A23, 2014. doi:10.1051/swsc/2014019
- Jin Y., Characterization of GPS scintillations of the polar ionosphere, Thesis of Philosophiae doctor, Oslo University, No.1759, 2016-1, 51 pages.
- Jin Y., Moen J.I., Miloch W.J., Clausen L.B.N., Oksavik K., Statistical study of the GNSS phase scintillation associated with two types of auroral blobs // Journ. Geophys. Res. Space Phys., V.121, issue 5, Pp.4679-4697, 2016-2. DOI:10.1002/2016JA022613.
- Jin Y, Moen J.I., Oksavik K., Spicher A., Clausen L.B.N., Miloch W.J., GPS scintillations associated with cusp dynamics and polar cap patches, J. Space Weather Space Clim. 7, A23, 2017. DOI: 10.1051/swsc/2017022
- Johansson T., Marklund G., Karlsson T., Liléo S., Lindqvist P.-A., Nilsson H., Buchert S., Scale sizes of intense auroral electric fields observed by Cluster // Ann. Geophys., V.25, P.2413–2425, 2007. www.anngeophys.net/25/2413/2007/
- Kaeppler S.R., Kletzing C.A., Bounds S.R., Gjerloev J.W., Anderson B.J., Korth H., LaBelle J.W., Dombrowski M.P., Lessard M., Pfaff R.F., Rowland D.E., Jones S., Heinselman C.J., Current closure in the auroral ionosphere: results from the auroral current and electrodynamics structure rocket mission, P.183-192, in monograph "Auroral Phenomenology and Magnetospheric Processes: Earth and Other Planets", ed. by Andreas Keiling A., Donovan E., Bagenal F., Karlsson T., AGU, Washington, DC, 2012.
- Kaeppler S.R. A rocket-borne investigation of auroral electrodynamics within the auroral-ionosphere, PHD diss. University of Iowa, 162 P., 2013.
- Kamide, Y., Sun, W., Akasofu S.-I., The average ionospheric electrodynamics for the different substorm phases, Journ. Geophys. Res., 101 (A1), P.99–109, 1996. doi:10.1029/95JA02990.
- Kaplan E., and Hegarty C., Understanding GPS: Principles and Applications, Artech House, 2006.
- Karlsson, T. and Marklund, G. T., A statistical study of intense low altitude auroral electric fields observed by Freja // Geophys. Res. Lett., V.23, P.1005, 1996.
- Karlsson T., Andersson L., Gillies D. M., Lynch K., Marghitu O., Partamies N., Sivadas N., Wu J., Quiet, discrete auroral arcs – observations // Space Science Reviews, 216:1, Pp.1-56, 2020, doi: 10.1007/s11214-020-0641-7
- Kendall E., Marshall R., Parris R.T., Bhatt A., Coster A., Pedersen T., Bernhardt P., Selcher C. Decameter structure in heater-induced airglow at the High frequency Active Auroral Research Program facility // Journ. Geophys. Res., V.115, A08306, 2010. doi:10.1029/2009JA015043
- Keskinen M. J., Ossakow S. L. (1983). Theories of high-latitude ionospheric irregularities: A review // Radio Science, V.18, issue 6, P. 1077–1091, 1983. <u>https://doi.org/10.1029/RS018i006p01077</u>
- Keskinen M.J., Mitchell H.G., Fedder J.A., Satyanarayana P., Zalesak S.T., Huba J.D., Nonlinear Evolution of the Kelvin-Helmholtz Instability in the High-Latitude Ionosphere // Journ. Geophys. Res., V. 93, No. A1, P. 137-152, 1988.
- Kinrade J., Mitchell C.N., Yin P., Smith N., Jarvis M.J., Maxfield D.J., Rose M.C., Bust G.S., Weatherwax A.T., Ionospheric scintillation over Antarctica during the storm of 5–6 April 2010 // Journ. Geophys. Res., V.117, A05304, 2012. doi:10.1029/2011JA017073.
- Kinrade J., Mitchell C.N., Smith N.D, Ebihara Y., Weatherwax A.T., Bust G.S., GPS phase scintillation associated with optical auroral emissions: First statistical results from the geographic South Pole // Journ. Geophys. Res. Space Physics, V.118, P. 2490–2502, 2013. doi:10.1002/jgra.50214
- Kintner P.M., Ledvina B.M., de Paula E.R., GPS and ionospheric scintillations // Space Weather, V.5, S09003, 2007, doi:10.1029/2006SW000260
- Knepp D.L., Wittwer L.A. Simulation of wide bandwidth signals that have propagated through random media // Radio Science V.19, Number 1, P. 303-318, 1984.
- *Knepp D.L.*, Multiple phase screen calculation of two-way spherical wave propagation in the ionosphere // Radio Sci., 51, Pp. 259–270, 2015. doi:10.1002/2015RS005915
- Knight S., Parallel electric fields, Planet. Space Sci., V.21, P. 741–750, 1973.

 $<sup>{\</sup>ensuremath{\mathbb C}}$ Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

- Knight H.K., Auroral ionospheric E region parameters obtained from satellite based far-ultraviolet and groundbased ionosond observations – effects of proton precipitation // Ann. Geophys., V.39, Pp.105-118, 2021. https://doi.org/10.5194/angeo-39-105-2021.
- Knipp D., Understanding Space Weather and the Physics Behind It, McGraw-Hill, 2011, 744 p. ISBN: 978-0073408903
- Knudsen D.J., Donovan E.F., Cogger L.L., Jackel B., Shaw W.D. // Width and structure of mesoscale optical auroral arcs // Geophys. Res. Lett., V. 28, Pp. 705-708, 2001.
- Kullen A., Janhunen P., Relation of polar auroral arcs to magnetotail twisting and IMF rotation: a systematic MHD simulation study // Ann. Geophys., V.22, P.951-970, 2004.doi:10.5194/angeo-22-951-2004
- Lee L.C., Theory of thin-screen scintillations for a spherical wave // The Astrophysical Journal, V.218, P. 468-476, 1977.
- Lessard M.R., Fritz B., Sadler B., Cohen I., Kenward D., Godbole N., Clemmons J.H., Hecht J.H., Lynch K.A., Harrington M., Roberts T.M., Hysell D., Crowley G., Sigernes F., Syrjðsuo M., Ellingson P., Partamies N., Moen J., Clausen L., Oksavik K., Yeoman T., Overview of the Rocket Experiment for Neutral Upwelling Sounding Rocket 2 (RENU2) // Geophys. Res. Lett., V.46, iss.21, 2019. https://doi.org/10.1029/2018GL081885
- Lorentzen D.A., Moen J., Oksavik K., Sigernes F., Saito Y., Johnsen M.G., In situ measurement of a newly created polar cap patch // Journ. Geophys. Res., V.115, A12323, 2010. doi:10.1029/2010JA015710
- Loucks D., Palo S., Pilinski M., Crowley G., Azeem I., Hampton D., High-latitude GPS phase scintillation from E region electron density gradients during the 20-21 December 2015 geomagnetic storm // Journ. Geophys. Res., V.122, P.7473-7490, 2017. doi:10.1002/2016JA023839.
- Lynch K.A., Hampton D.L., Zettergren M., Bekkeng T.A., Conde M., Fernandes P.A., Horak P., Lessard M., Miceli R., Michell R., Moen J., Nicolls M, Powell S.P., Samara M., MICA sounding rocket observations of conductivity gradient-generated auroral ionospheric responses: Small-scale structure with large-scale drivers // Journ. Geophys. Res. Space Physics, V.120, P. 9661–9682, 2015. doi:10.1002/2014JA020860.
- Lyons, L. R., The field-aligned current versus electric potential relation and auroral electrodynamics. In *Physics of Auroral Arc Formation* (Eds. Akasofu, S. -I. & Kan J. K.), P. 252–259, AGU, 2013.
- Lyons L.R., Nishimura Y., Zou Y., Unsolved problems: Mesoscale polar cap flow channels' structure, propagation, and effects on space weather disturbances // Journ.. Geophys. Res. Space Physics, V.121, Pp. 3347-3352, 2016a, doi:10.1002/2016JA022437.
- Machol J.L., Green J., Redmon R., Viereck R.A., Newell P.T. Evaluation of OVATION Prime as a forecast model for visible aurorae // Space Weather, V.10, 3, S03005, 2012. doi:10.1029/2011SW000746
- Maggiolo R., Echim M., Wedlund C.S., Zhang Y., Fontaine D., Lointier G., Trotignon J.-G., Polar cap arcs from the magnetosphere to the ionosphere: Kinetic modelling and observations by cluster and TIMED // Ann. Geophys. V.30, Pp. 283–302, 2012.
- Maggs J.E., and Davis T.N. // Measurements of the thickness of auroral structures // Planetary and Space Science, V.216, Pp. 205-209, 1968.
- Marklund G.T., Electric Fields and Plasma Processes in the Auroral Downward Current Region, Below, Within, and Above the Acceleration Region // Space Sci. Rev., 142., P. 1–21, 2009.doi: 10.1007/s11214-008-9373-9
- McGranaghan R., Godinez H., Morley S., Knipp D., Matsuo T., Global high-latitude conductivity modeling: New data and improved methods, Los Alamos Space Weather Summer School Research Reports, 2014, Pp.45-63, 2014.
- McGranaghan R., Knipp D.J., Matsuo T., High-latitude ionospheric conductivity variability in three dimensions. Geophys. Res. Lett., 43, P.7867-7877, 2016-1. doi:10.1002/2016GL070253
- McGranaghan R., Knipp D., Matsuo T., Solomon S., Cousins E., Redmon R., Fang X., Godinez H., Morley S., Kilcommons L., Ionospheric conductivity: Enabling geospacer system science, Presentation in Boston College Seminar Series, Thuesday Dec.6, 2016-2.
- McPherron R., El-Alaoui M., Walker R.J., Nishimura Y., Weygand J.M., The relation of N-S auroral streamers to auroral expansion // Journ. Geophys. Res., V.125, issue 4, 2020, e2019JA027063.
- Mella M.R., Lynch K.A., Hampton D.L., Dahlgren H., Kintner P.M., Lessard M., Lummerzheim D., Lundberg E.T., Nicolls M.J., Stenbaek-Nielsen H.C., Sounding rocket study of two sequential auroral poleward boundary intensifications // Journ. Geophys. Res., Space, V.116, A00K18, 2011. doi:10.1029/2011JA016428

- Mende S. B., Heetderks H., Frey H. U., Lampton M., Geller S. P., Habraken S., Renotte E., Jamar C., Rochus P., Spann J., Fuselier S. A., Gerard J.-C., Gladstone R., Murphree S., Cogger L. Far ultraviolet imaging from the IMAGE spacecraft. 1. System design // Space Sci. Reviews. V. 91. N1–2. P. 243-270. 2000. Doi:10.1023/a:100 5271728567
- Milan S.E., Hubert B., Grocott A., Formation and motion of a transpolar arc in response to dayside and nightside reconnection rates // Journ. Geophys. Res., V.110, A01212, 2005. Doi: 10.1029/2004JA0835
- Miles D.M., Mann I.R., Pakhotin I.P., Burchill J.K., Howarth A.D., Knudsen D.J., Lysak R.L., Wallis D.D., Cogger L.L., Yau A.W., Alfvénic Dynamics and Fine Structuring of Discrete Auroral Arcs: Swarm and e-POP Observations // Geophys. Res. Lett., V.45, P. 545–555. 2018 <u>https://doi.org/</u> 10.1002/2017GL076051
- Moen J., Walker I.K., Kersley L., Milan S.E., On the generation of cusp HF backscatter irregularities // Journ. Geophys. Res. Space Phys., V.107, A4, 1044, Pp. SIA 3-1 – SIA 3-5, 2002. doi:10.1029/2001JA000111.
- Moen, J., Qiu X.C., Carlson H.C., Fujii R., McCrea I.W. On the diurnal variability in F2-region plasma density above the EISCAT Svalbard radar // Ann. Geophys., V.26, P .2427–2433, 2008. doi:10.5194/angeo-26-2427-2008.
- Moen J, Oksavik K., Alfonsi L., Daabakk Y., Romano V., Spogli L. Space weather challenges of the polar cap ionosphere // J. Space Weather Space Clim. 3, A02, 2013. doi:10.1051/swsc/2013025
- Newell P.T., Sotirelis T., Wing S.Diffuse, monoenergetic, and broadband aurora: The global precipitation budget // Journ. Geophys. Res, V.114, A09207, 2009. doi:10.1029/2009JA014326
- Newell, P. T., Liou K., Zhang Y., Sotirelis T., Paxton L.J., Mitchell E.J., OVATION Prime-2013: Extension of auroral precipitation model to higher disturbance levels // Space Weather, 12, P. 368–379, 2014, doi:10.1002/2014SW001056.
- Nishimura Y., Lyons L.R., Zou Y., Oksavik K., Moen J.I., Clausen L.B., Donovan E.F., Angelopoulos V., Shiokawa K., Ruohoniemi J.M., Nishitani N., McWilliams K.A., Lester M., Day-night coupling by a localized flow channel visualized by polar cap patch propagation // Geophys. Res. Lett., V.41, Pp. 3701-3709, 2014. doi:10.1002/2014GL060301.
- Nishimura Y., Lessard M.R., Katoh Y., Miyoshi Y., Grono E., Partamies N., Sivadas N., Hosokawa K., Fukizawa M., Samara M., Michell R.G., Kataoka R., Sakanoi T., Whiter D.K., Oyama S.I., Ogawa Y., Kurita S., Diffuse and Pulsating Aurora // Space Sci. Rev. V.216, 4, 2020. <u>https://doi.org/10.1007/s11214-019-0629-3</u>
- Obuchi Y., Sakanoi T., Yamazaki A., Ino T., Okano S., Kasaba Y., Hirahara M., Kanai Y., Takeyama N. Initial observations of auroras by the multi-spectral auroral camera on board the Reimei satellite // Earth Planets Space., V.60., P. 827–835, 2008.
- Oguti T., Metamorphose of aurora // Memoirs Nat. Inst. Polar Res., Japan, Series A, Pp. 1-101, 1975.
- Oksavik K., Moen J., Carlson H.C., High-resolution observations of the small-scale flow pattern associated with a poleward moving auroral form in the cusp // Geophys. Res. Lett., V.31, L11807, 2004. doi:10.1029/2004GL019838
- Oksavik, K., Moen J., Carlson H.C., Greenwald R.A., Milan S.E., Lester M., Denig W.F., Barnes R.J., Multiinstrument mapping of the small-scale flow dynamics related to a cusp auroral transient // Ann. Geophys., V.23, P. 2657–2670, 2005.
- Oksavik K., Moen J.I., Rekaa E.H., Carlson H.C., Lester M., Reversed flow events in the cusp ionosphere detected by SuperDARN HF radars // Journ. Geophys. Res., V.116, A12303, 2011. doi:10.1029/2011JA016788.
- Oksavik K., van der Meerin C., Lorentzen D.A., Baddeley L.J., Moen J., Scintillation and loss of signal lock from poleward moving auroral forms in the cusp ionosphere // Journ. Geophys. Res. Space Physics, V. 120, Pp. 9161-9175, doi:10.1002/2015JA021528.
- Partamies N., Syrjäsuo M., Donovan E., Knudsen D., Dense Array Imaging SYstem prototype observations of missing auroral scale sizes // Proceedings of 33rd Annual European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods, IRF Sci. Rep., V.292, Pp.95–101, 2008. <u>http://www.irf.se/publications/proc33AM/partamies-etal.pdf</u>
- Partamies N., Syrjäsuo M., Donovan E., Connors M., Charrois D., Knudsen D., Kryzanowsky Z., Observations
  of the auroral width spectrum at kilometre-scale size // Ann. Geophys., V.28, Pp. 711-718, 2010.
- Press W.H., Flannery B.P., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Numerical Recipes in FORTRAN. In the of Scientific Computing. Cambridge. Cambridge University Press, Pp.2-9, 1992.

<sup>©</sup> Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

- Prikryl P., Ghoddousi-Fard R., Spogli L., Mitchell C.N., Li G., Ning B., Cilliers P.J., Sreeja V., Aquino M., Terkildsen M., Jayachandran P.T., Jiao Y., Morton Y.T., Ruohoniemi J.M., Thomas E.G., Y. Zhang Y., Weatherwax A.T., Alfonsi L., De Franceschi G., Romano V. GPS phase scintillation at high latitudes during geomagnetic storms, of 7–17 March 2012 – Part 2: Interhemispheric comparison // Ann. Geophys., V.33, P. 657–670, 2015. doi:10.5194/angeo-33-657-2015
- Prikryl P., Ghoddousi-Fard R., Weygand J.M., Viljanen A., Connors M., Danskin D.W., Jayachandran P.T., Jacobsen K.S., Andalsvik Y.L., Thomas E.G., Ruohoniemi J.M., Durgonics T., Oksavik K., Zhang Y., Spanswick E., Aquino M., Sreeja V. GPS phase scintillation at high latitudes during the geomagnetic storm of 17-18 March 2015 // Journ. Geophys. Res., V.121, issue 10, Pp. 10448-10465, 2016. https://doi.org./10.1002/2016JA023171.
- *Ratcliffe J.A.*, Some aspects of diffraction theory and their application to the ionosphere // R. Phys. Soc. Progr. Phys., V.19, P.188-267, 1954.
- Rezhenov B. V., A possible mechanism for theta aurora formation //Ann. Geophys., V.13, P. 698, 1995.
- *Rino C.L., and Carrano C.S.*, The application of numerical simulations in beacon scintillation analysis and modeling // Radio Sci., V. 46, RS0D02, 2011. doi:10.1029/2010RS004563.
- Robinson R.M., Tsunoda R.T., Vickrey J.F., Guerin L., Sources of F-region ionization enhancements in the nighttime auroral zone // Journ. Geophys. Res., V. 90, Pp. 7533-7546, 1985.
- Ruohoniemi, J. M., and Baker K.B., Large-scale imaging of high-latitude convection with Super Dual Auroral Radar Network HF radar observations // Journ. Geophys. Res., V.103, P.20797–20811, 1998. doi:10.1029/98JA01288.
- Sandahl I, Brändström U., Sergienko T., Fine structure of aurora // International Journal of Remote Sensing, V.32, No.11, P.2947-2972, 2011. doi:10.1080/01431161.2010.541507
- Sandholt P.E., Carlson H.C., Egeland A., Dayside and Polar Cap Aurora, in ser. Astrophysics and Space Science Library, V. 270, Kluver Academic Publishers, 2002, 287 P.
- Schunk R.W., and Nagy A.F., Ionospheres Physics, Plasma Physics, and Chemistry, 268 P. (2009), 2nd ed., Cambridge Univ. Press, Cambridge, U.K.
- Semeter J., Mrak S., Hirsch M., John Swoboda J., Akbaril H., Starr G., Hampton D., Erickson P., Lind F., Coster A., Pankratius V., GPS Signal Corruption by the Discrete Aurora: Precise Measurements from the Mahali Experiment // Geophys. Res. Lett., V.44, P. 9539–9546, 2017. https://doi.org/10.1002/2017GL073570
- Smith A.M., Mitchell C.N., Watson R.J., Meggs R.W., Kintner P.M., Kauristie K., Honary F., GPS scintillation in the high arctic associated with an auroral arc // Space Weather, V.6, S03D01, 2008. doi:10.1029/2007SW000349
- *Southwood D., Kivelson M.,* Magnetospheric interchange instability // Journ. Geophys. Res. Space Phys., V.92, issue 1, Pp. 109-116, 1987. <u>https://doi.org/10.1029/A092iA01p00109</u>.
- Spicher A., Cameron T., Grono E.M., Yakymenko K.N., Buchert S.C., Clausen L.B.N., Knudsen D.J., *McWilliams K.A, Moen J.I.*, Observation of polar cap patches and calculation of gradient drift instability growth times: A Swarm case study // Geophys. Res. Lett., V. 42, Pp. 201-206, 2015-1, doi:10.1002/2014GL062590.
- Spicher A., Miloch W.J., Clausen L.B.N., Moen J.I., Plasma turbulence and coherent structures in the polar cap observed by the ICI-2 sounding rocket // Journal Geophys. Res. Space Physics, V.120, Pp.10959-10978, 2015-2. doi:10.1002/2015JA021634.
- Spicher A., Ilyasov A.A., Miloch W.J., Chernyshov A.A., Clausen L.B.N., Moen J.I., Abe T., Saito Y., Reverse flow events and small-scale effects in the cusp ionosphere // Journ. Geophys. Res. Space Physics, V.121, P.10466–10480, 2016. https://doi.org/10.1002/2016JA022999
- Spicher A., Clausen L., Miloch W., Lofstad V., Jin Y., Moen J., Interhemispheric study of the polar cap patch occurrence based on Swarm in situ data // Journ. Geophys. Res. Space Physics, V. 122, Pp. 3837-3851, 2017, doi.org/10.1002/2016JA023750.
- Spicher A., Deshpande K., Jin Y., Oksavik K., Zettergren M.D., Clausen L.B.N., Moen J.I., Hairston M.R., and Baddeley L., On the Production of Ionospheric Irregularities Via Kelvin-Helmholtz Instability Associated with Cusp Flow Channels // Journ. Geophys. Res. Space Physics, V.125, issue. 6, P. 1-21, 2020. e2019JA027734. https://doi.org/10.1029/2019JA027734
- Spogli L., Alfonsi L., De Franceschi G., Romano V., Aquino M.H.O., Dodson A., Climatology of GPS ionospheric scintillations over high and mid-latitude European regions // Ann. Geophys., V.27, P.3429–3437, 2009.
   www.ann-geophys.net/27/3429/2009/.

- Strickland D.J., Jasperse J.R., Whalen J.A., Dependence of auroral FUV emissions on the incident electron spectrum and neutral atmosphere // Geophys. Res., V.88, A10, Pp.8051-8062, 1983.
- *Strickland D.J., Daniell Jr.R.E., Basu B., Jasperse J.* Transport-theoretical model for the electron-protonhydrogen atom aurora: 2. Model results // Journ. Geophys. Res., V.98, Pp.21533-21548, 1993.
- Tanaka T., Obara T., Watanabe M., Fujita S., Ebihara Y., Kataoka R., Formation of the Sun-aligned arc region and void (polar slot) under the null-separator structure // Journ. Geophys. Res. Space Phys., V.122, issue 4, Pp.4102-4116, 2017. https://doi.org./10.1002/2016JA023584.
- Tang B.B., Wang C., Large scale current systems developed from substorm onset: Global MHD results // Sci. China Technol. Sci. V.61, P. 389–396, 2018.
- *Tatarskii V.I.*, The Effects of the Turbulent Atmosphere on Wave Propagation, 1971, Nat. Tech. Inform. Serv., Springfield, Va.
- Tatarskii V.I., Ishimaru A, Zavorotny V., Wave Propagation in Random Media (Scintillation), 1993, Computer Science.
- Torr M. R., Torr D. G., Zukic M., Johnson R. B., Ajello J., Banks P., Cole K., Keffer C., Parks G., Tsurutani B., Spann J., A far ultraviolet imager for the international solar-terrestrial physics mission // Space Sci. Reviews, V.71. No.1–4, P. 329–383, 1995. doi:10.1007/BF00751335.
- Trondsen T.S., Cogger L.L., A survey of small-scale spatially periodic distorsions of auroral forms // Journ. Geophys. Res., V. 103, Pp. 9405-9416, 1998.
- Trondsen T.S., Cogger L.L., High-resolution television observations of black aurora // Journ. Geophys. Res., V.102, A1, Pp. 363-378, 1997.
- *Tsunoda, R. T.*, High-latitude F region irregularities: A review and synthesis // Rev. of Geophys., V.26, P.719-760, 1988.
- Van der Meeren C., Oksavik K., Lorentzen D., Jøran Idar Moen J.I., Romano V. GPS scintillation and irregularities at the front of an ionization tongue in the nightside polar ionosphere // Journ. Geophys. Res. Space Physics, V.119, P. 8624–8636, 2014. doi:10.1002/2014JA020114.
- Van der Meeren C., Oksavik K., Lorentzen D.A., Rietveld M.T., Clausen L.B.N., Severe and localized GNSS scintillation at the poleward edge of the nightside auroral oval during intense substorm aurora //Journ. Geophys. Res. Space Physics, V.120, P.10607–10621, 2015. doi:10.1002/2015JA021819.
- Van der Meeren C., Oksavik K., Lorentzen D.A., Paxton L.J., Clausen L.B.N., Scintillation and irregularities from the nightside part of a Sun-aligned polar cap arc // Journ. Geophys. Res. Space Phys., V.121, Pp.5723-5736, 2016.
- Van der Meeren C., Oksavik K., Lorentzen D.A., Observations of simultaneous multi-constellation GNSS scintillation in nightside aurora over Svalbard, Poster in Birkeland Centre for space Science, 2018.
- Van Dierendonck, A. J., Klobuchar, J., Hua, Q., Ionospheric scintillation monitoring using commercial single frequency C/A code Receivers // Proceedings of the 6th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Salt Lake City, UT, September 1993, P. 1333–1342.
- Wang Y., Zhang Q.-H., Jayachandran P. T., Lockwood M., Zhang S.-R., Moen, J., Xing Z.-Y., Ma Y.-Z., and Lester M., A comparison between large-scale irregularities and scintillations in the polar ionosphere // Geophys. Res. Letters, V.43, No.10, P. 4790–4798, 2016., https://doi.org/10.1002/2016GL069230
- Wang Y., Zhang Q.-H., Jayachandran P.T., Moen J., Xing Z.-Y., Chadwick R., Ma Y.-Z., Ruohoniemi J.M., Lester M., Experimental Evidence on the Dependence of the Standard GPS Phase Scintillation Index on the Ionospheric Plasma Drift Around Noon Sector of the Polar Ionosphere, Journ. Geophys. Res. Space Physics, V.123, Pp. 2370–2378, 2018. <u>https://doi.org/</u> 10.1002/2017JA024805
- Wang Y., Cao Zh., Xing Z.Y., Zhang Q.H., Jayachandran P.T., Oksavik K., Balan N., Shiokawa K., GPS Scintillations and TEC Variations in Association with a Polar Cap Arc // Journ. Geophys. Res. Space Physics, V.126, P.1-11, 2021, e2020JA028968. https://doi.org/10.1029/2020JA028968
- Wernik A.W., Alfonsi L., Materassi M., Ionospheric irregularities, scintillation and effect on systems // Acta Geophysica Polinica, V.52, №2, P. 237-249, 2004.

<sup>©</sup> Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

- Wing S., Johnson J.R., Theory and observations of upward field-aligned currents at the magnetopause boundary layer. Geophys. Res. Lett. V.42, P. 9149–9155, 2015.
- Yao Z., Pu Y., Rae I.J., Radioti A., Kubyshkina M.V., Auroral streamer and its role in driving wave-like pre-onset aurora // Geosci. Lett., V.4, No.8, P.1-7, 2017. doi: 10.1186/s40562-017-0075-6
- Yeh K.C., and Liu C.-H., Radio Wave Scintillations in the Ionosphere // Proceedings of the IEEE, V.70, No 4, P.324-360, 1982.
- Yeh, K.C., and Wernik A.W. On ionospheric scintillation, in Wave Propagation in Random Media (Scintillation), edited by V. I. Tatarski et al., P. 34–49, 1993, Int. Soc. for Opt. Eng., Bellingham, Wash.
- Zettergen M., Semeter J.L., Blelly P.L., Diaz M., Optical estimation of auroral ion upflow: Theory // Journ. Geophys. Res., V.112, A12310, 2007. doi:10.1029/2007JA0112691.
- Zhang Q.-H., Zhang B.-C., Moen J., Lockwood M., McCrea L.W., Yang H.-G., Hu H.-Q., Liu R.-Y., Zhang S.-R., Lester M., Polar cap patch segmentation of the tongue of ionization in the morning convection cell // Geophys. Res. Lett., V.40, Pp.2918-2922, 2013. doi:10.1002/grl.50616
- Zhang Y., Paxton L.J., Zhang Q., Xing Z. Polar cap arcs: Sun-aligned or cusp-aligned? Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 146, P.123–128, 2016. http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2016.06.001
- Zhang Q.-H., Zhang Y.-L., Wang C., Lockwoodd M., Yang H.-G., Tang B.-B., Xing Z.-Y., Oksavik K., Lyons L.R., Ma Y.-Z., Zong Q.-G., Moen J.I., Xia L.-D. Multiple transpolar auroral arcs reveal insight about coupling processes in the Earth's magnetotail // PNAS, V.117, No 28, P.16193-16198, 2020. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.2000614117
- Zhang Q-He, Zhang Y.-L., Wang C., Oksavik K., Lyons L.R., Lockwood M., Yang H.-G., Tang B.-B., Moen J.I., Xing Z.-Y., Ma Yu.-Z., Wang X.-Yu, Ning Y.-F., Xia L.-D., A space hurricane over the Earth's polar ionosphere // Nature Communications, V.12, 1207, P.1-10, 2021-1. https://doi.org/10.1038/s41467-021-21459-y
- Zhang, Q.-H., Zhang B.-C., Lockwood M., Hu H.-Q., Moen J., Ruohoniemi J.M., Thomas E.G., Zhang S.-R., 5 Yang H.-G., Liu R.-Y., McWilliams K.A., Baker J.B.H., Direct Observations of the Evolution of Polar Cap Ionization Patches // Science, V.339, 14, P.1597-1600, 2021-2 <u>http://science.sciencemag.org/</u>.
- Zhu L., Schunk R.W., Sojka J.J., Polar cap arcs: A review // Journ. Atmos. Sol.-Terr. Phys., V.59, Pp.1087-1126, 1997. https://doi.org/10.1016/S1364-6826(96)00113-7.
- Zou Y., Nishimura Y., Lyons L.R., Shiokawa K., Donovan E.F., Ruohoniemi J.M., McWilliams K.A, Nishitani N., Localized polar cap flow enhancement tracing using airglow patches: Statistical properties, IMF dependence, and contribution to polar cap convection // Journ. Geophys. Res. Space Physics, V.120, Pp. 4064-4078, 2015a, doi:10.1002/2014JA020946.
- Zou Y., Nishimura Y., Lyons L.R., Donovan E.F., Shiokawa K., Ruohoniemi J.M., McWilliams K.A, Nishitani N., Polar cap precursor of nightside auroral oval intensifications using polar cap arcs // Journ. Geophys. Res. Space Physics, V.120, P.10698–10711, 2015b, doi:10.1002/2015JA021816.

# FOUNDATIONS OF THE PERSPECTIVE METHODOLOGY OF COMPLEX STUDIES OF THE INFLUENCE OF AURORAL CHARACTERISTICS OF THE POLAR IONOSPHERE ON THE CONDITIONS OF PROPAGATION OF TRANSPOLAR SIGNALS. REVIEW OF FOREIGN EXPERIMENTS AND RESULTS OF SOME MODELS

A.K. Kuzmin, A.M. Merslyi, O.V. Nikiforov, A.A. Petrukovich, A.M. Sadovsky, A.A. Pozin, Yu.A. Shchukin, Y.N.Potanin

In the context of the article, the current state of research on the characteristics of the polar ionosphere is considered. The spectrum of the variety of scales of auroral structures that can occur on the path of signals in the ionosphere is illustrated by examples of auroral images and plasma characteristics obtained from different spacecraft orbits, from the Earth's surface and sounding rockets. Specific examples of the results of orbital, rocket and ground measurements of the characteristics of the polar ionosphere accompanying the generation of electron density irregularities and the scintillation of transpolar signals obtained by specific authors and groups of different laboratories in the polar regions of the ionosphere under various electrodynamic conditions are considered. Some results of modern models of generation of irregularities in the cusp and polar cap as the causes of scintillation of propagating signals are analyzed. Question: "Why does the generation of scintillations of GNSS signals occur when they "pierce" some auroral structures and does not arise when 'piercing" others?" - remains. The answer to it is most likely associated with the conditions for the generation and development of plasma instabilities, leading to the formation of structures of plasma inhomogeneities with a scale from several centimeters to several tens of kilometers of different scales in different layers of the ionosphere, different MLT sectors of the polar ionosphere, and different IMF conditions. How, with the help of what diagnostic tools and with the help of what models, in what specific sets of conditions it is necessary to obtain and analyze information about the state of local areas of the environment - this is a problem, the solution of which will allow in the future to learn how to predict the propagation conditions of transpolar signals. Therefore, promising research requires a methodological basis for the development of technologies for setting up experiments aimed at both global and local complex observations of auroral structures, longitudinal and closing currents, characteristics of plasma inhomogeneities in different layers of the ionosphere, and their influence on the conditions of wave propagation at frequencies, used by orbital navigation and other systems.

**KEYWORDS**: POLAR IONOSPHERE, INHOMOGENEITY, AURORAL EMISSIONS, ORBITAL DIAGNOSTICS, CHARACTERISTICS STATE CONTROL, SPACE WEATHER, PROPAGATION CONDITIONS OF TRANSPOLAR SIGNALS, MODELING OF IONOSPHERE IRREGULARITIES AND SCINTILLATIONS

<sup>©</sup> Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова