

# КОСМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА. КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ. ИССЛЕДОВАНИЕ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

УДК 523.59:551.594.5:621.371:550.388.2

## ПРЕИМУЩЕСТВА НАБЛЮДЕНИЙ АВРОРАЛЬНЫХ СТРУКТУР С ДВУХ ОРБИТ И ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИЙ 3D-РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ЭМИССИЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ С РАЗНЫХ ПОЗИЦИЙ ИМАДЖЕРОВ

А. К. Кузьмин, М. А. Баньщикова, И. Н. Чувашов,  
Г. М. Крученицкий, Ю. Н. Потанин

*С помощью ПО «Вектор-М» проанализированы ситуации условий для одновременных наблюдений одних и тех же областей аврорального овала перспективными имаджерами «Летиция» и «Аеровизор-ВИС/МП» с учётом ориентации каждого КА, полей зрения приборов и компоновки на борту в различные сезоны в северной и южной полярных зонах, а также ситуаций пролётов КА над наземной фотометрической сетью авроральных имаджеров MAIN в окрестности г. Апатиты и над другими точками в ночной околополярной зоне. Учитывая преимущества получения изображений авроральных эмиссий с разных угловых позиций наблюдения одновременно, рассматриваются возможные алгоритмы реконструкций объёмной структуры распределения интенсивности эмиссий в изображениях, полученных с орбиты и с наземных станций.*

**Ключевые слова:** дистанционная диагностика состояния полярной ионосферы, авроральные эмиссии, ситуации одновременных наблюдений с разных орбит, методы реконструкций изображений.

### Введение

Интенсивность эмиссий верхней атмосферы и ионосферы, географическое и геомагнитное расположение их особенностей, высота, местное время, динамика (статичность и/или движение) и структура авроральных форм прямо соотносятся с процессами, происходящими в магнитосфере при её взаимодействии с ионосферой. Необходимая для анализа состояния полярной ионосферы физическая информация заключена в изображениях авроральных эмиссий, получаемых с километровым пространственным и временным (доли секунды) разрешением, причём её эффективность возрастает при совокупности данных орбитальных фотометрических измерений с данными распределений заряженных частиц, полей и волн в магнитосфере и ионосфере, а также с данными измерений наземных спектрометров, камер всего неба, магнитометров, риометров и радаров. Методическое противоречие мгновенного пространственного охвата орбитальным имаджером всей авроральной области или её части и пространственного разрешения исчезает при работе изображающих камер, по меньшей мере, на двух типах орбит: на орбите типа Молния (например, эксперименты на космических аппаратах Viking, Polar и IMAGE [1 – 3]), обеспечившие глобальные крупномасштабные наблюдения эмиссий авроры в ВУФ-диапазоне), и локальные мелкомасштабные наблюдения с полярных

круговых орбит, плоскости которых пересекают разные часовые пояса MLT (эксперименты со спектрометрами и имаджерами SSUSI, GUVI, MAC, FAI на КА серии DMSP, TIMED, REIMEI, e-POP соответственно [4 – 7]). Максимальная информативность о магнитосферно-ионосферных процессах может быть достигнута при одновременных измерениях на вышеуказанных орбитах и промежуточных орбитах типа тех, на которых работали КА FAST, Freja, THEMIS [9 – 11], пролетавшие через области энергизации заряженных частиц в ближней магнитосфере, и вкуче с данными мировой наземной сети [12], включающей оптическую и радиоволновую диагностику ионосферы. Потребность в результатах диагностики этих процессов и мониторинга характеристик полярной ионосферы во временных масштабах, близких к реальным, связана не только с научными интересами геофизиков, но и с практическими интересами ряда отраслей, такими как связь, навигация КА и др., так как точность работы аппаратуры, работающей на разных орбитах в полярных областях, зависит от условий распространения сигналов в ионосфере [15, 17].

### Мотивация и задачи экспериментов

В проектах на КА «Метеор-МП» и КА «Зонд» поставлены задачи исследований мелкомасштабных авроральных процессов, мониторингирования ха-

рактических авроры на основе анализа реконструируемых объёмных изображений авроральных эмиссий из плоских, а в конечном счёте, мониторингования локальных объёмных распределений электронной концентрации, которые, как и энергетические характеристики высыпающихся заряженных частиц, функционально связаны с распределением интенсивности конкретных авроральных эмиссий в изображениях. Приоритетные условия для получения изображений возникают в конкретных ситуациях на ночных участках орбит при наблюдениях одних и тех же авроральных структур с ряда угловых позиций с помощью имаджеров, установленных на двух или более КА, «расположенных» на разных высотах в близких орбитальных плоскостях (см. далее). Исследования и дистанционный мониторинг эволюции локального вертикального объёмного распределения потока энергии и средней энергии высыпающихся заряженных частиц, а также локальной электронной концентрации в различных геомагнитных условиях – основная мотивация экспериментов с авроральными орбитальными имаджерами «Авроризор-ВИС/МП» и «Летиция».

В 2016 г. в печати появилось несколько новых обзоров, посвящённых физическим процессам в авроре, её основным типам, а также современным методическим и экспериментальным особенностям оптико-спектральных наблюдений с орбит основных характеристик авроры [13 – 15], в которых рассмотрены вопросы оптической диагностики состояния магнитосферно-ионосферных связей и сделан акцент [13] на важности дистанционной селекции разных типов авроры для оценки моментного влияния источников возбуждения, включая высыпающиеся в ионосферу заряженные частицы, характеризующиеся потоком энергии и средней энергией.

Современная магнитосферно-ионосферная физика выделяет 4 основных типа авроры, проиллюстрированные в [13 Fig.2]. Аврора (полярные сияния) возбуждается как заряженными частицами, высыпающимися в атмосферу и ионосферу из магнитосферы, так и дисперсионными Альвеновскими волнами, взаимодействующими с электронами ионосферы [8, 9]. Каждый из типов характеризуется не только специфическими физическими процессами в источниках возбуждения, но и многообразием собственной сопутствующей морфологии разных масштабов, динамичностью, спектральным составом, диапазоном интенсивности и другими характеристиками, отражающимися в узкополосных спектральных изображениях эмиссий авроры, получаемых с орбит и поверхности Земли.

Конкретные методические аспекты дистанционных измерений авроральных характеристик были рассмотрены в работах [15 – 17], выполненных по результатам Аванпроекта аппаратуры «Авроризор-ВУФ» и Дополнительного эскизного проекта (ДЭП) «Авроризор-ВИС», а также эскизного проекта (ЭП) аппаратуры «Летиция».

В конечном счёте, возможности авроральной диагностики зависят от геометрии эксперимента и реальных характеристик приборов, технических характеристик систем КА, параметров его орбиты, ориентации и точности её контроля на теневой стороне орбиты, а также от фоновой обстановки нижележащих слоёв атмосферы. Основой для решения задач авроральной диагностики являются детали идеологии постановки экспериментов, опирающейся на модель взаимодействия заряженных частиц с верхней атмосферой и ионосферой (см. например [19, 20]). Какое должно быть мгновенное поле наблюдения, какие эмиссии выбрать для наибольшей эффективности измерений (определяющих количество спектральных каналов), с какой чувствительностью и с каким пространственным и временным разрешением проводить измерения, зависящие от характеристик детектора изображений, на каких участках орбиты получать изображения и с какой информативностью, как диагностировать фоновую обстановку и корректировать изображения на вклад в интенсивность от «паразитных» источников – далеко не полный перечень вопросов, возникающих при создании авроральных имаджеров. Эти вопросы были подробно рассмотрены в [18].

#### **Специфика методики аврорального имаджинга с орбит перспективных КА «Метеор-МП» и КА «Зонд» и возможные ситуации одновременных наблюдений авроральных структур с двух орбит**

В связи с предварительной информацией о том, что вывод на орбиты КА «Метеор-МП» и КА «Зонд» (программа «Геофизика») может состояться на одном носителе, мы попытались проанализировать методические возможности наблюдений авроральных эмиссий, которые могут появиться у авроральных имаджеров «Авроризор-ВИС/МП» и «Летиция» (соответственно), разрабатываемых в настоящее время для установки на вышеуказанные КА. Предварительные характеристики имаджеров и параметры орбит КА описаны в [15, 17, 18]. Имеются принципиальные отличия в геометрии наблюдений авроры у каждого из этих приборов, а в соответствии с ней и возможности наблюдений авроры как порознь, так и двумя приборами (в разных ракурсах) при их одновременном пересечении северной авроральной зоны или магнитосопряжённой

ных полярных областей в северном и южном полушарии (см. рис. 1, *a*, *b*, *в*, *г*). Четыре «ситуации» спрогнозированы по предварительным н. у. для расчёта орбит взаимного расположения КА «Метеор-МП» и КА «Зонд» (табл. 1): *a* – оба КА пересекают северный авроральный овал так, что каналы авроральных имаджеров Авровизор-ВИС/МП «видят» одну и ту же авроральную структуру; *b* – КА Метеор-МП пересекает северный авроральный овал, а КА «Зонд» – южный, при этом оба КА могут «находиться» на одной и той же м. с. л.; *в* – оба КА пересекают южный авроральный овал так, что каналы авроральных имаджеров «Авровизор-ВИС/МП» «видят» одну и ту же авроральную структуру; *г* – КА «Зонд» пересекает северный авроральный овал, а КА «Метеор-МП» – южный, при этом оба КА могут «находиться» на одной и той же м. с. л. Эти возможности мы называем ситуациями, потому что они возникают с разной частотой на разных суточных витках КА, с разным процентом перекрытия наблюдаемых областей в зависимости от даты и времени запуска, разницы в высотах орбит, разницы в углах положения плоскостей орбит по отношению к Солнцу, от условий освещённости КА и полей наблюдений имаджеров на высотах авроральных эмиссий в зависимости от сезона, при этом условия наблюдений зависят от фазы Луны, рассеянный свет которой от подстилающей поверхности для авроральных наблюдений является паразитным фоновым источником. Дополнительные возможности для наблюдений появляются также при пролёте каждого из КА (и особенно одновременно) над конкретными районами на Земле (см. карты на рис. 2).

Карты (в географических координатах) спрогнозированных по скорректированным предварительным н. у. (см. табл. 2 и 3 соответственно) ситуаций одновременного пролёта КА «Метеор-МП» и КА «Зонд» над: фотометрической станцией ПГИ РАН (г. Апатиты), «наблюдающей» распределения интенсивности эмиссий природной авроры, показаны на верхней панели, и над ВЧ-стендом, вблизи пос. Гакона (Аляска), где расположены мощные источники модулированного ВЧ-радиоизлучения (нижняя панель), нагревающие холодную ионосферу и стимулирующие плазменные процессы, приводящие к искусственному возбуждению авроральных эмиссий с разными масштабами структур в распределениях их интенсивности (см. например рис. 3 в [15]). Красным цветом на рис. 2 отмечены точки проекций осей полей зрения имаджера «Летиция» (КА «Зонд»), а синим – осей полей зрения «Авровизор-ВИС/МП» (КА «Метеор-МП») на высоте эмиссии  $N_2^+$  100 км.

На рис. 3 показана возможная ситуация одновременных наблюдений авроральных структур с

помощью имаджеров «Авровизор-ВИС/МП» и «Летиция», установленных на КА «Метеор-МП» и КА «Зонд» (соответственно), на ночной стороне орбит. Для сравнения полей зрения «Авровизор-ВИС/МП» и аврорального имаджера МАС на КА REIMEI (Япония, 2005) условно показано поле зрения МАС, направленное вдоль м. с. л., пересекаемой в момент экспозиции КА REIMEI и КА «Метеор-МП». Справа вверху условно одинаковым показаны спектры  $N = f(E_e, p)$  высыпавшихся электронов и протонов регистрируемых электростатическим анализатором МСГИ-МП во время экспозиций изображений в каналах аппаратуры «Авровизор-ВИС/МП». Внизу (условно) показано реальное изображение авроральной эмиссии  $\lambda 427,8$  нм  $N_2^+$ , полученное имаджером МАС, на котором отмечена подножная точка м. с. л. (f. p.). Слева внизу показана панель с графиком силовой линии магнитного поля  $B_0$  в координатах  $x, y, z$ , с началом координат в центре Земли. На этой панели показаны элементарный объём свечения на конкретной высоте наблюдаемой эмиссии,  $L_{xi}, y_i(z)$  – интенсивность свечения элементарного объёма, а вдоль м. с. л. – элементарный столб свечения в диапазоне высот от  $H_{min}$  до  $H_{max}$ , проецируемый на один пиксел матрицы МАС,  $f_{xi}, y_i(E)$  – интенсивность первичных высыпавшихся электронов и протонов, а также вторичных электронов от них на высоте свечения элементарного объёма.

Расчёт прогноза ситуаций одновременного пересечения авроральной зоны двумя КА проводился с использованием высокоточной численной модели движения ИСЗ [18, 21, 49] при постоянной идеальной ориентации оси (+Y) КА «Зонд» на Солнце и ориентации КА «Метеор-МП» в надири при конкретных начальных условиях расчёта солнечно-синхронных орбит каждого из КА, представленных в табл. 1, которые были предварительно выбраны специалистами ВНИИЭМ для эффективного решения задач ДЗЗ на КА «Метеор-МП» и максимально длительного наблюдения Солнца телескопом на КА «Зонд». Для решения задачи использован блок «расчёта ситуаций» ПО «Вектор-М» [21, 22]. Задача прогноза заключалась в том, чтобы численно промоделировать орбиты и геометрию наблюдений, оценить частоту и интервалы геомагнитного местного времени (MLT) одновременных пролётов двух КА над одними и теми же неосвещёнными Солнцем участками северной авроральной зоны в периоды  $\pm 2$  месяца от зимнего солнцестояния 2025 – 2026 гг., ситуаций взаимного пересечения (наложения) областей видимости изображающих приборов в ночной авроральной зоне, а также в магнитно-сопряженных северных и южных полярных широтах, которые проиллюстрированы на рис. 1.

Таблица 1

**Предварительные начальные условия  
для расчёта орбит КА**

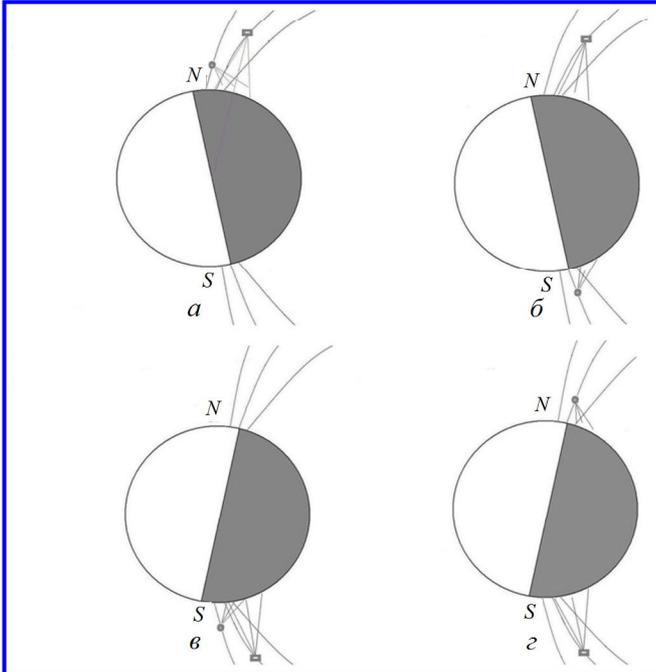
КА, $T_0$	$a$ , км	$e$	$i$ , °	$\Omega$ , °	$\omega$ , °	$M_0$ , °	$h$ , км
Метеор-МП 17.09.2025 00:00:00	7372.686	0.001835	99.333	0.0	0.0	0.0	820
Зонд 17.09.2025 00:00:00	7030.0	$1 \cdot 10^{-6}$	98.0	0.0	0.0	0.0	650

Примечание:  $T_0$  – дата и время (ТАИ) начала первого витка на экваторе (день, месяц, год; часы, минуты, секунды);  $a$  – большая полуось в км;  $e$  – эксцентриситет;  $i$  – угол наклона плоскости орбит к плоскости экватора в град.;  $\Omega$  – долгота восходящего узла в град.;  $\omega$  – угловое расстояние перигентра от узла в град.;  $M_0$  – средняя аномалия в эпоху в град.;  $h$  – высота в км.

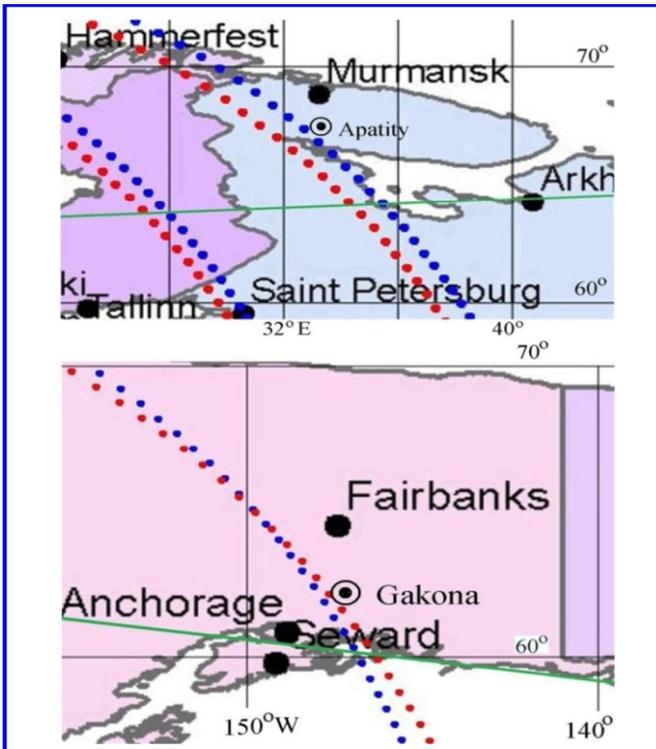
Оптимизация начальных условий орбит КА с целью решения всех поставленных задач будет проводиться позднее, когда будут приняты решения о варианте запуска и его даты.

На рис. 3 более детально проиллюстрирована ситуация (показана на рис. 1, а), взаимного пространственного пересечения («наложения») полей одновременного наблюдения двух авроральных эмиссий двумя имаджерами при пересечении северного аврорального овала КА «Метеор-МП» и «Зонд» на ночной стороне их орбит. При том, что углы полей зрения каналов «Авроризор-ВИС» и «Летиция» близки и составляют  $\sim 30^\circ$ , принципиальная разница в мгновенной геометрии наблюдений авроральной структуры при одновременных пересечениях КА авроральной зоны возникает из-за текущего состояния ориентации КА «Зонд» в пространстве. Постоянно поддерживаемая ориентация КА «Метеор-МП» по трём осям с направлением строительной оси  $-Z$  на центр Земли создаёт самые благоприятные условия для наблюдений авроры и получения последовательных частично перекрывающихся изображений авроры в трёх эмиссиях:  $\lambda 630$  нм [OI];  $\lambda 427,8$  нм  $N_2^+$  (1NG) и  $\lambda 486,1$  нм ( $H_\beta$ ), при этом проекция магнитной силовой линии (на высоты эмиссий), которую пересекает КА в «момент» экспозиции, отклонённой в авроральной зоне от направления в надир на  $\sim 12 - 14^\circ$ , всегда находится в поле наблюдений каждого канала. Контроль ориентации осей КА «Метеор-МП», а следовательно, осей каналов имаджера и всего множества элементарных векторов наблюдений, проецируемого пиксельного изображения, на неосвещённой стороне орбиты будет обеспечен с помощью звёздных ориентаторов с точностью до десятка угловых секунд.

Следует отметить, что кроме имаджера «Авроризор-ВИС», входящего в состав бортового



**Рис. 1. Четыре «ситуации», спрогнозированные по предварительным н. у. для расчёта орбит взаимного расположения КА «Метеор-МП» и КА «Зонд»:**  
□ – «Метеор-МП» и ○ – КА «Зонд»



**Рис. 2. Карты спрогнозированных по скорректированным предварительным н. у. ситуаций одновременного пролёта КА «Метеор-МП» и КА «Зонд» над фотометрической станцией ПГИ РАН (г. Апатиты) на верхней панели, и над ВЧ-стендом, нагревающим ионосферу вблизи пос. Гакона (Аляска) на нижней панели**

гелиогеофизического комплекса (ГГЭК-МП), в комплекс аппаратуры входят электростатические анализаторы электронов и ионов в диапазоне энергий от 0,2 до 15 кэВ, измеряющие энергетические распределения заряженных частиц в окрестности КА, и прецизионный магнитометр, который измеряет мелкомасштабные градиенты магнитного и электрического поля, сопутствующие продольным токам вдоль м. с. л. при высыпаниях частиц.

Геометрия и условия наблюдений авроры имаджером «Летиция» с орбиты КА «Зонд» значительно отличаются от условий наблюдения на КА «Метеор-МП». Это связано с тем, что ориентация КА «Зонд» строится специально для постоянных наблюдений Солнца с помощью бортового телескопа, и поэтому его строительная ось +Y всегда направлена на Солнце. При заходе КА в тень направление этой оси начинает медленно «уходить» от направления на Солнце из-за неидеальности центровки КА. В связи с этими обстоятельствами строительная ось -Z КА практически всегда отклонена от направления в надир на угол, который зависит от конкретного дня года. Оси каналов имаджера «Летиция» намеренно конструктивно отклонены от оси -Z в плоскости Y-Z на фиксированный угол 30° в сторону неосвещённой Солнцем атмосферы, что с одной стороны, позволяет захватывать полем зрения большую часть авроральной зоны, находящейся в тени, а с другой – позволяет «видеть» аврору в проекции на больших углах от нормали и получать изображения структуры авроры ближе к вертикальной, при этом проекция магнитной силовой линии на высоту свечения, которую КА «Зонд» пересекает в момент экспозиции, практически никогда не попадает в поле наблюдений каналов «Летиции», но это и не столь важно, так как установка анализаторов распределений высыпающихся заряженных частиц на этом КА не предусмотрена. Важно, что в ситуациях одновременных наблюдений одних и тех же структур с двух орбит могут быть получены серии изображений в проекции сверху («Метеор-МП») и серии изображений в боковой проекции («Зонд»), которая может приближаться к фронтальной в период, близкий к зимнему солнцестоянию. При этом, благодаря тому, что на борту этого КА «Метеор-МП» одновременно с экспозицией авроральных изображений будут проводиться измерения энергетических распределений высыпающихся электронов и ионов [15], всегда будет обеспечена возможность сравнения фактической и расчётной [19, 20, 23] (с учётом

знания современных значений сечений взаимодействия заряженных частиц с составляющими верхней атмосферы и ионосферы) интенсивности измеряемых эмиссий в окрестности подножной точки м. с. л. на высоте конкретной эмиссии, положение которой в изображении и координаты вычисляются с помощью блока трассирования м. с. л. ПО «Вектор-М».

Заметим, что пролёт КА над окрестностью наземных оптических станций (например, сетью имаджеров MAIN вблизи г. Апатиты (ПГИ РАН) [24]) и одновременных наблюдений авроральных структур с орбиты и с поверхности Земли также является одной из конкретных ситуаций, которую удалось спрогнозировать с помощью коррекции предварительных начальных условий для расчёта орбиты КА «Метеор-МП» (табл. 2). В правом нижнем углу рис. 3 (справа внизу) условно показаны углы поля зрения имаджеров сети MAIN [24], а спрогнозированный пример такой ситуации 21 января 2026 г. показан на фрагменте карты (рис. 2, верхняя панель), на которой показаны проекции центров пересекаемых областей наблюдений на высоту эмиссии  $N_2^+$  (100 км) «Авровизор-ВИС/МП» (синий цвет), и «Летиции» (красный цвет). Также с помощью коррекции н. у. (табл. 3) удалось спрогнозировать пролёт двух КА над ВЧ-стендом вблизи пос. Гакона (Аляска) 19 января 2026 г. К сожалению, фаза Луны в указанные даты будет более четверти, что создаст высокий уровень фоновых засветок при измерениях, но авторы полагают, что по мере приближения к реальной дате старта и расчётах реальных н. у. для орбит КА будет возможность оптимизировать их так, чтобы в зимний период в северном полушарии подобные ситуации возникли при фазовых углах Луны  $\Psi$  (угол Земля – Луна – Солнце), близких к максимальному, т. е. в другие даты. Это лишний раз указывает на то, что поиск наиболее эффективных ситуаций при наблюдениях авроры с двух КА, работающих на разных орбитах одновременно, является многокритериальной задачей.

Учитывая, что за всю историю наблюдений с низких орбит с помощью авроральных имаджеров в видимой области спектра было проведено всего два эксперимента [6, 7], с целью сравнить с геометрией наблюдений готовящихся российских приборов на рис. 3 условно нанесены угол поля зрения и пример изображения авроральной структуры в эмиссии  $\lambda 427,8$  нм  $N_2^+$ , полученного одним из каналов мультиспектрального аврорального имаджера MAC на КА REIMEI (Япония) 22 декабря 2005 г. в 09.31.46,54 UT [25]. Высота круговой полярной орбиты этого спутника была ~630 км, размер изображения (~35 × 35 км), что соответствует углу поля зрения изображающего канала

МАС ( $\sim 3,8^\circ$ ) [25] и масштабу рисунка. Текущая ориентация осей КА REIMEI строилась целевым образом так, чтобы проекция м. с. л. была всегда в поле изображения МАС. Пространственное разрешение  $\sim 2$  км/пиксел достигалось, когда регистрирующие матрицы ( $1024 \times 1024$ ) работали в режиме бинирования  $16 \times 16$ . Время экспозиции кадра было  $\sim 0,06$  с. Показанный пример изображения авроральной структуры именно в эмиссии  $N_2^+$  был выбран специально еще и потому, что первая отрицательная система иона молекулы азота является прямым индикатором потока энергии высыпавшихся электронов [26]. Пример наблюдений с КА REIMEI намеренно встроен в рис. 3 для того, чтобы обратить внимание читателя, на то, что при планировании работы МАС японскими специалистами было спрогнозировано  $\sim 60$  ситуаций и проведены скоординированные сопряжённые по м. с. л. одновременные орбитальные и наземные наблюдения (МАС-REIMEI – ALIS) авроральных структур в течение 2005 г. во время пролётов КА REIMEI над Скандинавской оптической сетью ALIS [26], когда одна из конкретных станций этой сети находилась в окрестности подножной точки м.с.л., которую пересекал КА во время экспозиции. Сеть станций ALIS (не показана на рис. 3) находится вблизи ф. р. м. с. л., показанной синим цветом.

На рис. 1 показан набор возможных ситуаций, в которых возникают условия для наблюдений авроры одновременно с двух КА не только в одной

Таблица 2

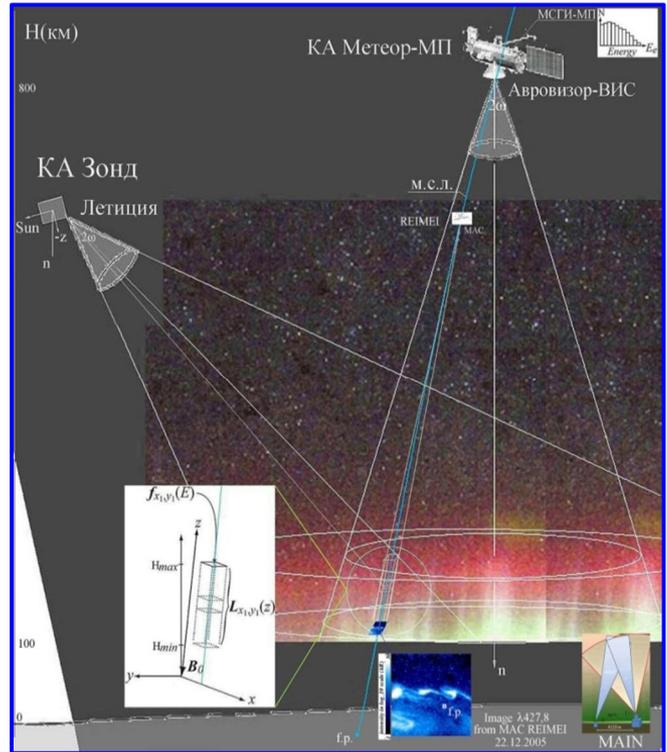
**Скорректированные начальные условия для расчёта прогноза орбит КА на январь 2026 г. с целью поиска одновременных пролётов над фотометрической станцией в окрестности г. Апатиты**

$T_0/\text{КА}$	$a$ , км	$e$	$i$ , °	$\Omega$ , °	$\omega$ , °	$M_0$ , °	$h$ , км
Метеор-МП 17.09.2025 00:00:00	7372.686	0.001835	99.333	12.0	0.0	0.0	820
Зонд 17.09.2025 00:00:00	7030.0	$1 \cdot 10^{-6}$	98.0	12.0	0.0	0.0	650

Таблица 3

**Скорректированные начальные условия для расчёта прогноза орбит КА на январь 2026 г. с целью поиска одновременных пролётов над ВЧ стандом в окрестности пос. Гакона (Аляска)**

$T_0/\text{КА}$	$a$ , км	$e$	$i$ , °	$\Omega$ , °	$\omega$ , °	$M_0$ , °	$h$ , км
Метеор-МП 17.09.2025 00:00:00	7372.686	0.001835	99.333	-5	-5	10.0	820
Зонд 17.09.2025 00:00:00	7030.0	$1 \cdot 10^{-6}$	98.0	-5	-5	10.0	650



**Рис. 3. Геометрия возможной ситуации одновременных наблюдений авроральных структур с помощью имаджеров «Авроризор-ВИС/МП» и «Летиция», установленных на КА «Метеор-МП» и КА «Зонд» (соответственно), ночная сторона орбит**

и той же северной, или южной, авроральных зонах, но и одновременных наблюдений в магнитно-сопряженных областях. Такие как на рис. 1, б и г ситуации ограничены периодами близкими к условиям равноденствия из-за требования, чтобы высота тени HSHADE превышала высоту орбит КА в обоих авроральных овалах, северном и южном [22], что возможно при больших геомагнитных возмущениях ( $Kp > 5$ ), когда их экваториальная граница «спускается» в средние широты. Возможности мониторинга условий в полярной ионосфере при таком типе ситуаций были рассмотрены в наших работах [15, 17]. Расчёт ситуаций (с учётом геометрии наблюдений имаджеров «Авроризор-ВИС/МП» и «Летиция») проводился на основе предварительных начальных условий для орбит КА Метеор-МП и КА «Зонд» (табл. 1) с помощью программы Вектор-М, созданной в НИ ПММ ТГУ по ТЗ ЦАО-ИКИ, описанной в [21, 22]. Ситуации такого типа, как на рис. 1, а, могут повторяться (с разной степенью перекрытия полей наблюдения аврорального свечения двумя имаджерами) примерно раз в двое или четверо суток на разных суточных витках, что связано с разницей в периодах обращения КА вокруг Земли ( $\sim 101$  и  $\sim 98$  мин для «Метеор-МП» и «Зонд»

соответственно). Как показывают результаты расчётов, процент перекрытия полей наблюдения имаджеров в одной и той же авроральной зоне может быть разным и редко бывает более 90%, как на рис. 3) что, как указывалось выше, в значительной степени зависит от конкретных начальных условий орбит, состояния мгновенной ориентации строительных осей КА «Зонда» на неосвещённой части орбиты, которая заранее прогнозируется с грубой точностью, и захватываемой широтной области аврорального овала, которая зависит от конкретных геомагнитных условий. Среднестатистическая экваториальная граница аврорального овала нанесена на фрагменты карт (см. рис. 2) зелёной линией для средних геомагнитных условий при величине трёхчасового планетарного индекса  $K_p = 3$  [27].

**Возможности для реконструкции объёмных авроральных изображений из данных «Авровизор-ВИС/МП» и «Летиция», которые будут получаться во время спрогнозированных ситуаций взаимного «расположения» двух КА при их пересечении одного и того же сектора аврорального овала**

Мотивация. Авроральные реконструкции нужны для восстановления и оценки 3D-распределений интенсивности измеренных конкретных авроральных эмиссий из плоских изображений, а, в конечном счёте, для оценки локальных 3D-распределений электронной концентрации и поперечных проводимостей, являющихся основными критериями условий распространения сигналов в конкретных секторах полярной ионосферы. Реконструкции авроральных структур возможно проводить из ограниченного числа изображений, зарегистрированных приборами в ограниченном диапазоне ракурсов и углов зрения [28].

Суть методов в том, чтобы на основе данных наблюдений авроры с помощью авроральных изображающих камер (орбитальных имаджеров), регистрирующих двумерные (широта-долгота) изображения распределений интенсивности конкретных эмиссий в авроральных структурах под различными зенитными и азимутальными углами, с помощью инверсии реконструировать трёхмерные распределения интенсивности эмиссий в единице объёма, и на их основе восстанавливать объёмные распределения потока энергии и средней энергии высыпающих заряженных частиц, а также электронной концентрации  $N_e$  в максимуме E-области ионосферы [23]. Развитие методов происходило на основе проведения анализа изображений авроральных структур, полученных при наземных наблюдениях с триангуляционных сетей изображающих приборов, созданных в ПГИ РАН (MAIN), в Скандинавских странах (ALIS) и Канаде

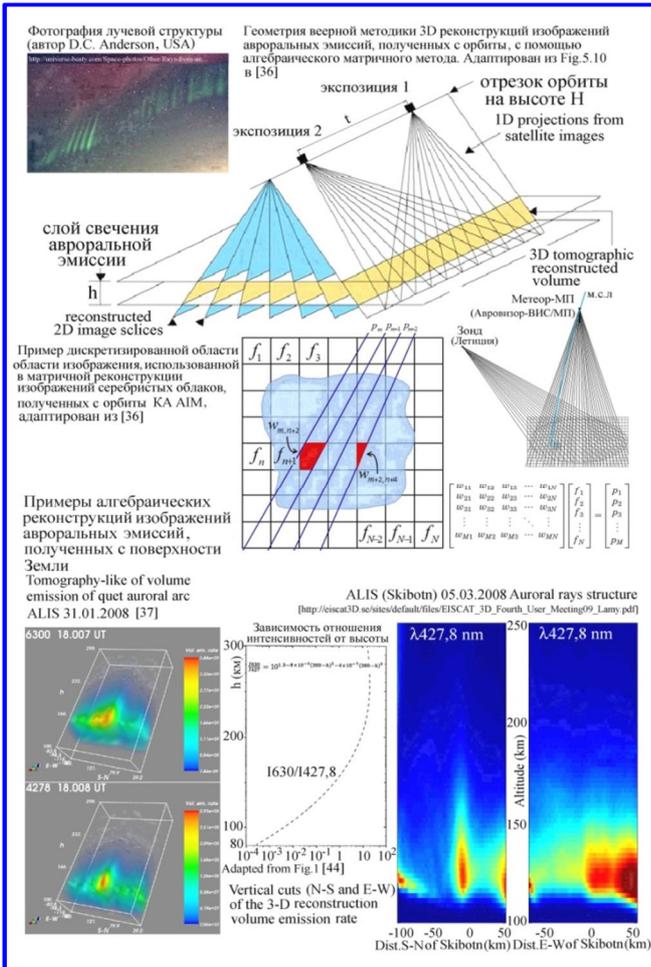
(MIRACLE и DAISY). Чем больше изображающих камер «расставлено» для наблюдений в окрестности авроральной структуры, тем точнее может быть реконструкция её объёмного изображения [29]. Когда одна или множество авроральных структур наблюдаются с нескольких направлений при последовательных экспозициях серии изображений, не всегда возможно разрешить все их детали и определить вклад каждой структуры в интенсивность на изображении. Одной из причин этого может быть затенение одной структурой (более интенсивной) другую (менее интенсивную). Поэтому считается, что авроральная томография является некорректно поставленной инверсной задачей из-за ограниченного числа точек наблюдения и ракурсов. Близкое по времени (в пределах нескольких десятков секунд) почти одновременное получение изображений одной и той же авроральной структуры или их множества в нескольких авроральных эмиссиях с ограниченного числа различных угловых позиций, включая орбитальные наблюдения с двух КА, позволяет реконструировать объёмное изображение. Именно поэтому геофизики называют этот дистанционный метод «томографически подобной реконструкцией» [30, 37].

Обзоры развития алгоритмов и методов (алгебраических, матрично-алгебраических, стохастических) реконструкций авроральных изображений были представлены в [28, 31 – 38]. В основном они касались алгоритмов классической томографии и радиотомографии ионосферы, алгоритмов реконструкций изображений природных и искусственно возбуждённых авроральных эмиссий, полученных с европейской сети наземных станций, а также в ракетных и орбитальных оптических экспериментах наблюдений авроры в тангенциальной геометрии. Ещё с периода МГГ и 1960-х гг. известно, что локальные интенсивности авроральных эмиссий и электронной концентрации коррелируют, и стало понятно, что дистанционно измеренные распределения интенсивности можно использовать для оценки локальной плотности ионосферной плазмы. В [28, 39] авторы обратили внимание на то, что большинство методов реконструкции работают при соотношении сигнал/шум

$$S / N = 10 \log \left( \frac{\sum_{l=1}^L p_l^2}{\sum_{l=1}^L \Delta p_l^2} \right) > 10, \quad (1)$$

где  $\Delta p_l$  – ошибки, возникающие на пути луча от источника до приёмника.

*Комментарий. В общем виде задача томографии звучит так: Задано два (H и K) Гилбертовых*



**Рис. 4.** В верхней части рисунка (справа) показана веерная геометрия и методика 3D-реконструкций структур свечения с помощью матричного метода [36]. Слева сверху показан пример фотографии лучевой авроральной структуры, сделанной D. С. Anderson. В середине рисунка показан пример дискретизированной области изображения аврорального свечения, смоделированный в [36], использованный в реконструкции

(обобщённых Эвклидовых) пространства, допускающих бесконечную размерность и линейный оператор  $A$  из пространства  $H$  внутри пространства  $K$ , проекция  $p$  функций  $f \in H$  может быть описана как  $p = Af$ . Томография решает инверсную задачу: из всех возможных  $p \in K$  найти  $f \in H$  так, чтобы  $Af = p$ . Такая задача считается корректно поставленной, если находится её единственное решение для каждого  $p \in K$  и если решение зависит непрерывно от  $p$ . В противном случае задача считается поставленной некорректно [40].

Наблюдаемый объём эмиссии делится на элементарные кубики (воксели) со значениями, представляющими величину интенсивности эмиссии в единице объёма  $f(r)$ , тогда интеграл в (3) преобразуется в сумму (2) от координат в каждом из них

$(x, y, z)$ , представляющих усреднённое значение интенсивности  $f(x, y, z)$ :

$$p_i(m, n) \approx C' \sum_{x,y,z} h_{xyz}^{mn} f(x, y, z), \quad (2)$$

где  $i$  – элементарное направление от наблюдателя,  $m$  и  $n$  – номер строки и столбца элементарного пиксела изображения,  $h_{xyz}^{mn}$  – вклад каждого воксела в угле, стягивающем его из элементарного пиксела  $(m, n)$  в конусной геометрии для двумерной проекции  $p(m, n)$ ,  $C'$  – параметр, описывающий рассеяние и поглощение на пути луча. В самом общем виде проекция или изображение 3D-распределения интенсивности авроры  $p_i(m, n)$  представлена в [41] в виде

$$p_i(m, n) = C \cdot \int_0^{\infty} f(\mathbf{r}) \exp\left\{-\int_{s=0}^{s=r} \mu(s) ds\right\} d\mathbf{r}, \quad (3)$$

где  $f(\mathbf{r})$  – 3D-распределение от центра  $\mathbf{r} = 0$ , а  $\mu(s)$  – параметр, описывающий поглощение атмосферой для комбинированного случая наземных и орбитальных наблюдений.

Реконструкция осуществляется через решение системы линейных уравнений со значениями множеств величин интенсивности, полученных в ограниченной серии 2D-измерений в элементарных «лучах», стягиваемых каждым пикселом регистрирующей матрицы, включая и обратные проекции, получение которых возможно при триангуляции, и определить оценку  $f'$  функции  $f$ . Искомым результатом реконструкции является 3D-изображение объёмного распределения интенсивности конкретной эмиссии в наблюдаемой авроральной структуре, пример таких изображений в эмиссиях  $\lambda 427,8$  и  $\lambda 630$  нм, полученных на ALIS [37], можно видеть на рис. 4 (слева внизу). В верхней части рис. 4 (справа) показана веерная геометрия и методика 3D-реконструкций структур свечения с помощью матричного метода [36]. Слева сверху показан пример фотографии лучевой авроральной структуры, сделанной D. С. Anderson. В середине рисунка показан пример дискретизированной области изображения аврорального свечения, смоделированный в [36], использованный в реконструкции. Здесь вклад каждого пиксела в измеренную проекцию определяется весовым коэффициентом  $w$ , получающимся при пересечении луча с пикселом (показан красным цветом). Область изображения наблюдаемого объекта затенена серо-голубым цветом. Справа от этой области условно показана геометрия наблюдений структуры одной и той же обла-

сти аврорального свечения имаджерами «Авровизор-ВИС/МП» и «Летиция» с орбит КА «Метеор-МП» и «Зонд» соответственно. В нижней части рисунка – слева примеры 3D-реконструкций авроральных изображений авроральной эмиссии  $N_2 + \lambda 427,8$  нм и  $\lambda 630$  [OI], полученных с наземной оптической сети ALIS с использованием алгебраических методов, а справа два ортогональных плоских разреза N-S и W-E изображения эмиссии  $N_2 + \lambda 427,8$ . В середине внизу показана зависимость отношения интенсивности эмиссий I630/I427,8 от высоты, аналитическое выражение показано над ним, это отношение функционально связано со средней энергией высыпавшихся электронов [48].

Технология реконструкций авроральных изображений строилась на основе адаптированных итеративных алгебраических алгоритмов MART, SIRT, SART, CART, PCART и др., которые были развиты для одновременных авроральных наблюдений с сети наземных станций и алгоритмов и для анализа данных спутниковой радиотомографии [42]. Эти алгоритмы подразумевают выбор и использование в процессе начальных стартовых распределений интенсивности и критерия его остановки для получения результата [43]. В пределах этого набора алгоритмов существуют их разновидности как самостоятельных, так и связанных. Каждый из алгоритмов имеет свои преимущества и недостатки, выявленные при решении конкретных задач реконструкций структуры авроральных форм.

Когда количество ракурсов наблюдения объекта ограничено на ограниченном временном интервале, перспективным представляется «матричный метод», использованный в [36] для реконструкции изображений серебристых облаков, полученных с орбиты. По сути, он построен на том, что в веерно-лучевой геометрии анализируются вертикальные 2D-разрезы изображения объекта (авроральной эмиссии), которые проектируются на строки матричного приёмника имаджера. На рис. 4 показана эта геометрия и эффект проявления уменьшения сигнала в каждом квадратном элементе матрицы-разреза вертикальной структуры авроры в конкретной эмиссии. Сигнал, измеренный на каждом угле, эквивалентен сумме в каждом элементе на пути соседних лучей на сетке. Вклад конкретного элемента в проекцию определяется весовыми коэффициентами  $w$ . Весовые коэффициенты рассчитываются по нормированной площади между соседними лучами.

В дискретизированном представлении проекция  $p$  является произведением весового коэффициента  $w$  и численного значения интенсивности на пикселе  $f$  на сетке разреза, наблюдаемого сверху слоя свечения (см. рис. 4):

$$P = wf. \quad (4)$$

Измеренная проекция может быть выражена как сумма

$$p = \sum_{n=1}^N w_n f_n \quad (5)$$

Множество проекций составляет систему линейных уравнений

$$\begin{aligned} w_{11}f_1 + w_{12}f_2 + w_{13}f_3 + \dots + w_{1N}f_N &= p_1 \\ w_{21}f_1 + w_{22}f_2 + w_{23}f_3 + \dots + w_{2N}f_N &= p_2 \\ \dots & \\ w_{M1}f_1 + w_{M2}f_2 + w_{M3}f_3 + \dots + w_{MN}f_N &= p_M \end{aligned} \quad (6)$$

которая может быть выражена матричным уравнением

$$\begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & w_{13} & \dots & w_{1N} \\ w_{21} & w_{22} & w_{23} & \dots & w_{2N} \\ w_{31} & w_{32} & w_{33} & \dots & w_{3N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{M1} & w_{M2} & w_{M3} & \dots & w_{MN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \vdots \\ f_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ \vdots \\ p_M \end{bmatrix} \quad (7)$$

Название «Матричные методы» появилось из типов матричных уравнений ( $\overline{W} \cdot \vec{f} = \vec{p}$ ), которые на практике часто содержат большое множество элементов, значительная часть из которых может быть недоопределена.

Большинство общих приближений, чтобы найти решения этой системы, использует набор томографических методов известных как алгебраические методы реконструкций (ARTs) [35]. ARTs-методы включают набор коррекционных алгоритмов, в которых начальное изображение постепенно улучшается при помощи проведения итераций. Важное влияние на количество проводимых коррекций имеет начальное заданное значение  $f$ . Варьирование начальным значением  $f$  может использоваться в комбинации со специфическими искусственными (модельными) изображениями объекта(ов), при этом коррекционный коэффициент регулярно обновляется. Он рассчитывается при итерационных сравнениях томографических проекций предварительного изображения с измеренными проекциями.

Коррекционный алгоритм в PCART строится на основе (8)

$$f_{m,n} = f_{m-1,n} + \lambda \frac{(p_m - p_m^i)w_{m,n}}{N_m}, \quad (8)$$

где  $f_{m,n}$  является дискретным значением реконструированного изображения для  $m_{th}$  луча и  $n_{th}$  пиксела. Дополнение коррекционного коэффициента к предварительным значениям изображения  $f_{m-1, n}$  обеспечивает итеративный шаг для реконструкционной методики. Элементы весовой матрицы даются  $w_{m, n}$ , а приближение к пределу коррекций (сходимости) может контролироваться параметром  $\lambda$ . Измеренные проекции соответствуют  $p_m$ , а рассчитанные проекции соответствуют  $p_m^i$ .  $N_m$  является общим весом в  $m_{th}$  луче и может быть выражен как сумма каждого индивидуального весового коэффициента для  $N$  элементов в площади изображения

$$N_m = \sum_{n=1}^N w_{m,n} \quad (9)$$

Альтернативным подходом решения задачи реконструкции является стохастическая инверсия, которая, как правило, не использует никаких начальных распределений, но может использовать априорную информацию для регуляризации задачи инверсии. Эта информация об элементах наблюдаемой структуры (предварительная оценка координат, включая высоту, формы структуры на соответствие каталогу структур (дуги, лучистые дуги, отдельные лучи, полосы, пятна и др.), а также направления м. с. л. в конкретных точках [23, 28, 43], учитывая причинно-следственную связь авроральных структур с конфигурацией магнитных силовых линий, вдоль которых происходит высыпание заряженных частиц, возбуждающих эмиссии. При этом попадание проекции магнитной силовой линии на высоту измеряемой эмиссии, которую в момент экспозиции изображения пересекает спутник, добавляет априорную информацию ещё и потому, что на борту в этот момент измеряются энергетические распределения авроральных электронов и ионов (см. рис. 3).

Использовать стохастические методы, применённые в [44] для реконструкции распределений потока энергии высыпавшихся электронов непосредственно из плоских изображений, полученных с Земли, для реконструкции орбитальных авроральных изображений значительно сложнее из-за достаточно высокого фона со сложной структурой, возникающего за счёт отражения авроральных структур от подстилающей поверхности с непрогнозируемым распределением коэффициента отражения (либо снег и лед  $\alpha \sim 0,8$ , либо облачность  $\alpha \sim 0,5$ ), а также за счёт добавки отражённого от подстилающей поверхности света Луны.

*Комментарий. Физическая причина этого явления в том, что в геометрии наблюдений авро-*

*ральной структуры сверху тангенциальное усиление изотропного излучающего слоя за счёт эффекта Ван-Райна увеличивает отражение от Земли на больших зенитных углах, в то время как рассеяние света от Ламбертовской поверхности (снег, лёд) происходит по закону косинуса, приводя к более интенсивному свету, излучаемому вверх от Земли, чем от излучающего слоя. В результате искомая истинная двумерная функция распределения интенсивности в изображении авроральной структуры «сворачивается» под интегралом с рядом уширяющих функций, включая рассеяние и поглощение атмосферы по пути луча. Итерационным методом определяется  $\alpha$  с последующей коррекцией наблюдаемой двумерной функции и вычислением истинной функции распределения интенсивности в авроральной структуре. Эта коррекция проводится на этапе обработки сырых изображений [45, 46] до их использования в реконструкции.*

### Заключение

Рассмотрены возможности и преимущества технологии одновременных наблюдений одних и тех областей (фрагментов) авроральных структур с орбит двух перспективных КА «Метеор-МП» и «Зонд» на разных высотах, которые могут быть запущены на одном носителе в 2025 г. На базе созданного ПО «Вектор-М», используя предварительные начальные условия орбит этих КА, проведён предварительный анализ периодичности возможных ситуаций пересечений северного и южного аврорального овала и возможности одновременных наблюдений авроральных эмиссий в рамках геометрий наблюдений имаджеров «Авровизор-ВИС/МП» (КА «Метеор-МП») и «Летиция» (КА «Зонд»). Это сделано на основе предварительных начальных условий для расчёта орбит КА. Поиск ситуаций проводился по ряду критериев. Ситуации перекрытия полей наблюдения двух имаджеров происходят в течение  $\sim 1 - 1,5$  мин один раз в двое или четверо суток на разных суточных витках с разным процентом перекрытия наблюдаемых площадей. При координированной (по времени экспозиций) съёмке распределений интенсивности эмиссий в авроральных структурах с частотой раз в 1 – 3 с во время ситуаций перекрытий изображений магнитная силовая линия, которую пересекает в КА «Метеор-МП» в момент экспозиции изображений, всегда находится в поле изображения имаджера «Авровизор-ВИС/МП», а также попадает в поле наблюдений имаджера «Летиция». Это обеспечивает условия для модельного тестирования эмиссий в подножной точке м. с. л. на основе одновременно измеряемых на КА «Метеор-МП» рас-

пределений электронов и протонов. Проанализированы возможные ситуации одновременного пересечения северного и южного авроральных овалов каждым из спутников. Вероятность, что оба КА будут пересекать ночной авроральный овал, повышается при возмущённых геомагнитных условиях, когда экваториальная граница сдвигается в сторону средних широт. Периодичность таких ситуаций также составила примерно один раз в течение двух – четырех суток в периоды, близкие к весеннему и осеннему равноденствию, в том числе и ситуаций одновременного попадания в поле наблюдения «Летиции» подножной точки м. с. л., которую в противоположном полушарии пересекает КА «Метеор-МП».

Близкие по времени (в пределах нескольких десятков секунд) почти одновременные изображения одной и той же авроральной структуры в нескольких авроральных эмиссиях с ограниченного числа различных угловых позиций, включая орбитальные наблюдения с двух КА, позволят решать задачу реконструкции объёмного изображения структуры, хотя она считается некорректно поставленной инверсной задачей из-за ограниченного числа ракурсов. Такие ситуации спрогнозированы при пролётах двух КА над заданными точками. Изображения авроры, которые будут получены на суточных витках, проходящих над окрестностью конкретной наземной сети оптических наблюдений (например, сетью MAIN вблизи г. Апатиты (ПГИ РАН)) или над другими конкретными районами, представляют интерес для реконструкций и анализа вместе с априорными наземными данными о структуре эмиссий (в случаях безоблачных погодных условий).

Представлены примеры алгебраических реконструкций наземных изображений авроральных эмиссий и рассмотрен матричный алгоритм, представляющий интерес именно для орбитальных 3D-реконструкций при направлениях наблюдений, близких к нормальным, и при сложных условиях фоновой обстановки в подстилающем объёме. Мы полагаем, что одновременное получение изображений авроральных эмиссий сверху во время взаимного расположения КА на разных орбитах над одним и тем же сектором аврорального овала позволит приблизиться к решению задачи получения объёмных распределений интенсивности в авроральных структурах, и, в конечном счёте, позволит дистанционно получать локальные объёмные энергетические характеристики высыпающихся заряженных частиц и электронной концентрации в *E*-области ионосферы, что существенно необходимо для диагностики состояния полярной ионосферы в интересах решения прикладных задач.

### Сокращения

ВУФ – вакуумный ультрафиолет  
 ДЗЗ – дистанционное зондирование Земли  
 ДЭП – дополнительный эскизный проект  
 м. с. л. – магнитная силовая линия  
 н. у. – начальные условия (параметры) расчёта орбит  
 AIM – Aeronomy of Ice in the Mesosphere  
 АСТ – Aurora Computed Tomography  
 ALIS – Auroral Large Imaging System  
 ART – Algebraic Reconstruction Technique  
 CART – Constraine Algebraic reconstruction Technique  
 CBCT – Cone Beam Computed Tomography  
 CIPS – cameras - Cloud Imaging and Particle Sizes  
 CNA – Cosmic Noise Absorption  
 DAISY – (Canadian) Dense Array Imaging System  
 f. p. – (foot point/foot print) подножная точка магнитной силовой линии на конкретной высоте или на поверхности Земли  
 G-ACT – Generalized – Aurora Computed Tomography  
 LBH – Lyman Birdge Hopfield (спектральные полосы  $N_2$ )  
 MART – Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique / Memory ART  
 MIRACLE – Magnetometer, Ionospheric Radar, and All-sky Camera Large Experiment  
 MLT – Magnetic Local Time  
 MAIN – Multiscale (Modified) Aurora Imaging Network  
 PCART – Partially Constrained Algebraic Reconstruction Technique  
 PMC – Polar Mesospheric Clouds  
 SART – Simultaneous Algebraic Reconstruction Technique  
 SIRT – Simultaneous Iterative Reconstruction Technique  
 SSUSI – Special Sensor Ultraviolet Spectrographic Imager  
 TAI – Temps Atomique International  
 voxel – volume cell

### Литература

1. Anger C. D., et al. (1987), An ultraviolet imager for the Viking spacecraft, *Geophys. Res. Lett.*, 14, 387 – 390, doi:10.1029/GL014i004p00387.
2. Torr M. R., et al., (1995), A Far Ultraviolet Imager for the international Solar-Terrestrial Physics Mission, *Space Sci. Rev.*, 71(1-4), 329 – 383, doi:10.1007/BF00751335.
3. Mende S. B., et al., (2000a), Far ultraviolet imaging from the IMAGE spacecraft. 1. System design, *Space Sci. Rev.*, 91(1/2), 243-270; doi:10.1023/A:1005271728567.
4. Paxton L. J., Meng C.-I., Fountain G. H., Ogorzalek B. S., Darlington E. H., Goldsten J., Peacock K. SSUSI: Horizon-to-horizon and limb-viewing spectrographic imager for remote sensing of environmental parameters, *Ultraviolet Technology IV*, SPIE. – V. 1764. – P. 161 – 176, 1992.
5. Paxton L. J., Christensen A. B., Morrison D., Wolven B., Kil H., Zhang Y., Ogorzalek B. S., Humm D. C., Goldsten J., DeMajistre R., and Meng C.-I. (2004) GUVI: A hyperspectral imager for geospace. *Instruments, Science and Methods for Geospace and Planetary Remote Sensing*, by C. A. Nardel, P. G. Lucey, Jeng-Hwa Yee, J.B. Garvin. *Proc. of SPIE.* – V. 5660. – Pp. 228 – 240.

6. 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.
7. Cogger L., Howarth A., Yau A., White A., Enno G., Trondsen T., Asquin D., Gordon B., Marchand P., Ng D., Burkley G., Lessard M., Sadler B. Fast Auroral Imager (FAI) for the e-POP mission. *Space Sci. Rev.*, V. 189. – Pp. 15 – 25, doi:10.1007/s11214-014-0107-x, 2014.
8. Chaston C. C., Bonnel J. W., Carlson C. W., McFadden J. P., Ergun R. E., Strangeway R. J., Properties of small-scale Alfvén waves and accelerated electron from FAST, *Journ. Geophys. Res.*, 108, p.8003, doi:10.1029/2002JA009420, 2003.
9. Chaston C. C., Carlson C. W., McFadden J. P., Ergun R. E., and Strangeway R. J., How important are dispersive Alfvén waves for auroral particle acceleration?, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L07101, doi:10.1029/2006GL029144, 2007.
10. Murphree J. S., Jonhson M. L., Cogger L. L., Hearn D. J., Freja UV Imager observations of spatially periodic auroral distortions, *Geophys. Res. Lett.*, 21, 1887-1890, 1994.
11. Bester M., Lewis M., Roberts B., McDonald J., Pease D., Thorness J., Frey S., Cosgrove D., Rummel D., THEMIS operations, *Space Sci. Rev.*, 141, 91 – 115, doi:10.1007/s11214-008-9456-7, 2007.
12. Mende S. B., Harris S. E., Frey H. U., Angeelopoulos V., Russel C. T., Donovan E., Jackel B., Greffen M., Peticolas L. M. The THEMIS array of ground-based observatories for the study of auroral substorms. *Space Sci. Rev.*, V. 141, Pp. 357 – 387, doi:10.1007/s11214-008-9380, 2008.
13. Mende S. B. Observing the magnetosphere through global auroral imaging: 1. Observables. *Journ. Geophys. Res.*, V.121, iss.10. – Pp.10623-10637, doi:10.1002/2016/JA022607, 2016.
14. Mende S. B. Observing the magnetosphere through global auroral imaging: 2. Observing techniques, *Journ. Geophys. Res.: Space Physics*. – V. 121, issue, Pp.10638-10660, doi:10.1002/2016/JA022558, 2016.
15. Кузьмин А. К., Банышикова М. А., Крученицкий Г. М., Мерзлый А. М., Потанин Ю. Н., Чувашов И. Н. Прикладные аспекты измерений авроральных эмиссий и характеристик полярной ионосферы имаджером Авровизор-ВИС/МП перспективном КА Метеор-МП. *Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. Приложение за 2016 год. – М. : АО «Корпорация «ВНИИЭМ»», 2016. – С. 325 – 341.*
16. Кузьмин А. К., Мерзлый А. М. Перспективный эксперимент по контролю состояния ионосферы Земли с помощью оптического комплекса «Авровизор-ВУФ» в составе группировок высокоапогейных и низкоорбитальных космических аппаратов / А.К. Кузьмин, А.М. Мерзлый // *Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М. : ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»», 2014. – Т. 143. – № 6. – С. 19 – 28.*
17. Кузьмин А.К., Банышикова М.А., Доброленский Ю.С., Крученицкий Г.М., Маслов И.А., Мёрзлый А.М., Моисеев П.П., Потанин Ю.Н., Чувашов И.Н. Характеристики создаваемого орбитального имаджера Авровизор-ВИС/МП и перспективы использования авроральных изображений для исследований процессов в полярной ионосфере и оптического контроля неоднородности условий, влияющих на распространение сигналов. *Сб. «Практические аспекты гелиогеофизики», С. 114 – 133, ИКИ РАН, 2016.*
18. ДЭП (Дополнение к эскизному проекту на ГАК-МП в части трехканального имаджера видимого диапазона Авровизор-ВИС/МП). *Пояснительная записка ЦИНВ.412125.005, РКС. – 2015. – 163 с.*
19. Иванов В.Е., Козелов Б.В. Прохождение электронных и протонно-водородных пучков в атмосфере Земли, *Апатиты, Изд. КНЦ РАН, 2001. – 260 с.*
20. Козелов Б. В., Иванов В. Е., Сергиенко Т. И. Вариации интенсивности эмиссий полярных сияний в области совместных высипаний электронов и протонов: возможности диагностики параметров потоков частиц Геоманг. *Аэроном*, 2002. – Т. 42. – № 4. – С. 513 – 518.
21. Банышикова 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 высших учебных заведений. Физика. №10/2, С. 106 – 111, 2012.*
22. Банышикова М. А., Чувашов И. Н., Кузьмин А. К. Предварительные результаты расчета сопутствующей геофизической и астрономической информации для эксперимента с прибором Авровизор-ВИС/МП на перспективном КА Метеор-МП, *Известия высших учебных заведений. Физика. №10/2, С. 174 – 180, 2013.*
23. Dashkevich Zh. V., Ivanov V. E., Khudukon, Features of stable diffuse arcs observed by means of auroral tomography, *Ann. Geophys.*, 25, 2007. – Pp. 1131 – 1139.
24. Kozelov B. V. MAIN (Multiscale Aurora Imaging Network) auroral cameras: overview of events observed during last winter seasons. *Proceeding of the 10<sup>th</sup> Intl Conf. «Problems of Geocosmos» (Oct.6-10, 2014, St-Petersburg, Russia, V. 328 – 333, 2014.*
25. 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.
26. Axelsson K., Sergienko T., Nilsson H., Brandstrom U., Assamura K., Sakanoi T. First negative system of N<sub>2</sub><sup>+</sup> in aurora: simultaneous space-borne and ground-based measurements and modeling results. *Ann. Geophys.*, 32, 499 – 506, 2014.
27. [www.swpc.noaa.gov/wing](http://www.swpc.noaa.gov/wing) Кр[NOAA/NWS Space Weather Prediction Center.
28. Frey H.U., Frey S., Lanchester B.S., Kosch M. Optical tomography of aurora and EISCAT, *Ann.Geophysicae*, 16, Pp. 1332 – 1342, 1998.
29. Tanaka I.-M., Aso T., Gustavsson B., Tanabe K., Ogawa Y., Kadokura A., Miyaoka H., Sergienko T., Brandstorm U., Sandahl I., Feasibility study on Generalized-Aurora Computed Tomography, *Ann. Geophys.*, 29, 551 – 562, 2011.
30. Partamies N., Gustavsson B., Sangalli L., Syrjasuo M., Donovan E., Connors M., Charriois D., Tomography-like approach for analyzing colour auroral images, *Geophysica*, 48(1-2), pp. 81 – 90, 2012.
31. Gustavsson B., A study of feasible tomographic inversion techniques for ALIS, IRF Technical Report 039, 37 pp., Swedish Institute of Space Physics, Kiruna, Sweden, 1992.

32. Aso T., Ejiri M., Urashima A., Miyaoka H., Ake Steen, Brandstrom U., Gustavsson B. First results of auroral tomography from ALIS-Japan multi-station observations in March 1995, *Earth Planet Space*, 50, 81 – 86, 1998.
33. Gilbert, P., Iterative methods for the three-dimensional reconstruction of an object from projections, *J. Theor. Biol.*, 36, pp. 105 – 117, 1972.
34. Herman G.T., and Lent A., Iterative reconstruction algorithms, *Compt. Biol.*
35. Kak A.C., Slaney M., Principles of computerized tomographic imaging, IEEE Press, New York, 329 p., 1988.
36. Hart II V.P., The application of tomographic reconstruction techniques to ill-conditioned inverse problems in atmospheric science and biomedical imaging, diss. of Doctor of philosophy in physics, Utah State University, 153 p., 2012.
37. Enell C.-F., Gustavsson B., Brandstrom B.U.E., Sergienko T.I., Verronen P.T., Rydesator P., Sandahl I., Tomography-like retrieval of auroral volume emission ratios for the 31 January 2008 Hotel Payload 2 event, *Geoscience Instrum. Method Data Syst. Discuss.*, 2, pp. 1 – 21, 2012.
38. Frey S., and Frey H.U., Auroral emission profiles extracted from three dimensional reconstructed arcs, *Journ. Geophys. Res.*, V. 101, №A10, pp. 23731 – 23741, 1996.
39. Verhoeven D., Limited-data computed tomography algorithms for the physical sciences, *Appl. Opt.*, V. 32, Pp. 3736 – 3754, 1993.
40. Натгерер Ф. Математические аспекты компьютерной томографии, перевод с англ., изд. Мир, 1990.
41. Budinger T.F., Gullberg G.T., Huesman R.H., Emission computed tomography, in *Image reconstruction from projections*, Ed. by G.T. Herman, Springer, New York, pp. 147 – 246.
42. Austen J.R., Franke S.J., Liu C.H., Yeh K.C., Application of computerized tomography techniques to ionospheric research, in *Radio beacon contribution to the study of ionization and dynamics of the ionosphere and correction to geodesy*, Ed. by Tauriainen, Univ. of Oulu, Finland, Part 1, 25 – 35, 1986.
43. Nygren T., Markkanen M., Lehtinen M., Kaila K., Application of stochastic inversion in auroral tomography, *Ann. Geophysicae*, 14. – Pp. 1124 – 1133, 1996.
44. Janhunen P., Reconstruction of electron precipitation characteristics from a set of multiwavelength digital all-sky auroral images. *Journ. Geophys. Res.*, V. 101 – № A9. – Pp. 18505 – 18516, 2001.
45. Hays P.B., Anger C.D., Influence of ground scattering on satellite auroral photometry. *Appl. Opt.*, V. 17. – N12. – Pp. 1898 – 1904, 1978.
46. Murphree J.S., Anger C.D., An empirical method for determining albedo contribution to satellite photometer data. *Remote Sensing of Environment*, v.9, pp183-187, 1980.
47. Авдюшев В.А. Численное моделирование орбит. – Томск: Изд-во НТЛ, 2010. – 284 с.
48. Steel D.P., McEwen D.J., Electron auroral excitation efficient and intensity ratios, *Journ. Geophys. Res.*, V. 95, pp. 10321 – 10336, 1990.
49. Бордовицына Т. В., Авдюшев В. А. Теория движения искусственных спутников Земли. Аналитические и численные методы: учеб. пособие. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2007. – 220 с.

Поступила в редакцию 02.10.2017

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

*Мария Александровна Баныцкова*, кандидат физико-математических наук, доцент, т. (3822) 529-776, e-mail: [mha-tomsk@mail.ru](mailto:mha-tomsk@mail.ru).

*Иван Николаевич Чувашов*, кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник, т. (3822) 529-776, e-mail: [chuvashovin@gmail.com](mailto:chuvashovin@gmail.com). (НИ ТГУ).

*Григорий Михайлович Крученицкий*, доктор физико-математических наук, заведующий отделом, т. (495) 408-61-41, e-mail: [omd@cao-rhms.ru](mailto:omd@cao-rhms.ru).

*Юрий Николаевич Потанин*, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, т. (495) 408-61-72, e-mail: [omd@cao-rhms.ru](mailto:omd@cao-rhms.ru). (ФГБУ ЦАО Росгидромета).

## ADVANTAGES OF OBSERVATION OF AURORAL STRUCTURES FROM TWO ORBITS AND POSSIBILITIES FOR RECONSTRUCTION OF 3D-EMISSION DISTRIBUTIONS RECEIVED FROM DIFFERENT POSITIONS OF IMAGERS

**A. K. Kuzmin, M. A. Banshchikova, I. N. Chuvashov, G. M. Kruchenitskii, Iu. N. Potanin**

*The scenarios and conditions of simultaneous observation of the same areas of auroral oval using perspective auroral imagers Leticia and Aurovisor-VIS/MP have been analyzed with the help of Vector-M software taking into consideration the attitude of each SC, the fields of view and configuration of the on-board instruments during different seasons in the northern and southern polar zones, as well as scenarios of SC flight over the ground-based Multiscale Aurora Imaging Network (MAIN) near the city of Apatity and over other points in the night-time polar zones. Taking into account the advantages of getting auroral emission images from different observation angles simultaneously, possible algorithms of reconstruction of three-dimensional structure of emission distribution in the images received from the orbit and from the ground stations are considered.*

**Key words:** tele-diagnostics of polar ionosphere, auroral emissions, scenarios of simultaneous observation from different orbits, image reconstruction techniques.

### List of References

1. Anger C. D., et al. (1987), An ultraviolet imager for the Viking spacecraft, *Geophys. Res. Lett.*, 14, 387 – 390, doi:10.1029/GL014i004p00387.
2. Torr M. R., et al., (1995), A Far Ultraviolet Imager for the international Solar-Terrestrial Physics Mission, *Space Sci. Rev.*, 71(1-4), 329-383, doi:10.1007/BF00751335.
3. Mende S. B., et al., (2000a), Far ultraviolet imaging from the IMAGE spacecraft. 1. System design, *Space Sci. Rev.*, 91(1/2), 243-270, doi:10.1023/A:1005271728567.
4. Paxton L. J., Meng C.-I., Fountain G. H., Ogorzalek B. S., Darlington E. H., Goldsten J., Peacock K. SSUSI: Horizon-to-horizon and limb-viewing spectrographic imager for remote sensing of environmental parameters, *Ultraviolet Technology IV*, SPIE. – V. 1764. – P. 161 – 176, 1992.
5. Paxton L. J., Christensen A. B., Morrison D., Wolven B., Kil H., Zhang Y., Ogorzalek B.S., Humm D.C., Goldsten J., DeMajistre R., and Meng C.-I. (2004) GUVI: A hyperspectral imager for geospace. *Instruments, Science and Methods for Geospace and Planetary Remote Sensing*, by C.A. Nardel, P.G. Lucey, Jeng-Hwa Yee, J.B. Garvin. Proc. of SPIE. – V. 5660. – Pp. 228 – 240.
6. Obuchi Y., Sakanoi T., Yamazaki A., Ino T., Okano S., Kasaba Y., Hirahara M., Kanai Y., Takeyama N. Initial observations of aurooras by the multi-spectral auroral camera on board the Reimei satellite, *Earth Planets Space*. – V. 60. – P. 827 – 835, 2008.
7. Cogger L., Howarth A., Yau A., White A., Enno G., Trondsen T., Asquin D., Gordon B., Marchand P., Ng D., Burkley G., Lesard M., Sadler B. Fast Auroral Imager (FAI) for the e-POP mission. *Space Sci. Rev.*, V. 189. – Pp. 15 – 25, doi:10.1007/s11214-014-0107-x, 2014.
8. Chaston C. C., Bonnel J. W., Carlson C. W., McFadden J. P., Ergun R. E., Strangeway R. J., Properties of small-scale Alfvén waves and accelerated electron from FAST, *Journ. Geophys. Res.*, 108, p.8003, doi:10.1029/2002JA009420, 2003.
9. Chaston C. C., Carlson C. W., McFadden J. P., Ergun R. E., and Strangeway R. J., How important are dispersive Alfvén waves for auroral particle acceleration?, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L07101, doi:10.1029/2006GL029144, 2007.
10. Murphree J. S., Jonhson M. L., Cogger L. L., Hearn D. J., Freja UV Imager observations of spatially periodic auroral distortions, *Geophys. Res. Lett.*, 21, 1887 – 1890, 1994.
11. Bester M., Lewis M., Roberts B., McDonald J., Pease D., Thorness J., Frey S., Cosgrove D., Rummel D., THEMIS operations, *Space Sci. Rev.*, 141, 91 – 115, doi:10.1007/s11214-008-9456-7, 2007.
12. Mende S. B., Harris S. E., Frey H. U., Angeelopoulos V., Russel C. T., Donovan E., Jackel B., Greffen M., Peticolas L.M. The THEMIS array of ground-based observatories for the study of auroral substorms. *Space Sci. Rev.* – V. 141. – 357 – 387, doi:10.1007/s11214-008-9380, 2008.
13. Mende S. B. Observing the magnetosphere through global auroral imaging: 1. Observables. *Journ. Geophys. Res.*, v.121, iss.10, Pp.10623-10637, doi:10.1002/2016JA022607, 2016.
14. Mende S. B. Observing the magnetosphere through global auroral imaging: 2. Observing techniques, *Journ. Geophys. Res.: Space Physics*, v.121, issue, Pp.10638-10660, doi:10.1002/2016JA022558, 2016.
15. Kuzmin A. K., Banshchikova M. A., Kruchenitskii G. M., Merzlyi A. M., Potanin Iu. N., Chuvashov I. N. Applied aspects of measurements of auroral emissions and characteristics of the polar ionosphere by Aurovisor-VIS/MP on the perspective spacecraft Meteor-MP. *Matters of Electromechanics. VNIIEM Proceedings. Appendix 2016.* – M. : JC «VNIIEM Corporation», 2016. – Pp. 325 – 341.
16. Kuzmin A. K., Merzlyi A. M. Experimental monitoring of the Earth's ionosphere using the Aurovisor-VUV optical system integrated on a constellation of high-apogee and low-orbiting satellites / A.K. Kuzmin, A.M. Merzlyi // *Matters of Electromechanics. VNIIEM Proceedings.* – M.: JSC «VNIIEM Corporation», 2014. – Vol. 143. – No. 6. – Pp. 19 – 28.
17. Kuzmin A. K., Banshchikova M. A., Dobrolenskii Iu. S., Kruchenitskii G. M., Maslov I. A., Merzlyi A. M., Moiseev P. P., Potanin Iu. N., Chuvashov I. N. Characteristics of orbital imager Aurovisor-VIS/MP and prospects of using auroral images for investigation of processes in the polar ionosphere and optical monitoring of nonuniformity of conditions affecting signal propagation. Collected volume 'Practical aspects of heliogeophysics', pp. 114 – 133, Space Research Institute of RAS (IKI RAN), 2016.
18. Supplement to preliminary design of GGAK-MP, the part covering the three-channel visible range imager Aurovisor-VIS/MP. Explanatory note ЦИHB.412125.005, Russian Space Systems, 2015. – 163 p.
19. Ivanov V. E., Kozelov B. V. Propagation of electron and proton-hydrogen beams in the Earth's atmosphere, Apatity, Publication by Kola Science Center of RAS, 260 p., 2001.
20. Kozelov B. V., Ivanov V. E., Sergienko T. I. Auroral intensity variations in the area of combined electron and proton particles precipitation: possibilities of determination of particle flux parameters. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2002. – Vol.. 42. – No. 4. – Pp. 513 – 518.
21. Banshchikova M. A., Chuvashov I. N., Kuzmin A. K. Application software system Vektor-M for calculation of attendant geophysical and astronomical information for the observation space in the experiment with Aurovisor-VIS/MP on the Meteor-MP spacecraft, *Proceedings of higher educational establishments. Physics. No. 10/2*, Pp. 106 – 111, 2012.
22. Banshchikova M. A., Chuvashov I. N., Kuzmin A. K. Preliminary results of calculation of attendant geophysical and astronomical information for the experiment with Aurovisor-VIS/MP on the perspective Meteor-MP spacecraft, *Proceedings of higher educational establishments. Physics. No. 10/2*, Pp. 174 – 180, 2013.
23. Dashkevich Zh. V., Ivanov V. E., Khudukon, Features of stable diffuse arcs observed by means of auroral tomography, *Ann. Geophys.*, 25, Pp. 1131 – 1139, 2007.
24. Kozelov B. V. MAIN (Multiscale Aurora Imaging Network) auroral cameras: overview of events observed during last winter seasons. Proceeding of the 10<sup>th</sup> Intl Conf. 'Problems of Geocosmos' (Oct.6-10, 2014), St-Petersburg, Russia, V.328-333, 2014.

25. 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.
26. Axelsson K., Sergienko T., Nilsson H., Brandstrom U., Assamura K., Sakanoi T. First negative system of  $N_2^+$  in aurora: simultaneous space-borne and ground-based measurements and modeling results. *Ann. Geophys.*, 32, 499 – 506, 2014.
27. www.swpc.noaa.gov/wing Kp|NOAA/NWS Space Weather Prediction Center.
28. Frey H.U., Frey S., Lanchester B.S., Kosch M. Optical tomography of aurora and EISCAT, *Ann. Geophysicae*, 16, Pp. 1332–1342, 1998.
29. Tanaka I.-M., Aso T., Gustavsson B., Tanabe K., Ogawa Y., Kadokura A., Miyaoka H., Sergienko T., Brandstorm U., Sandahl I., Feasibility study on Generalized-Aurora Computed Tomography, *Ann. Geophys.*, 29, 551 – 562, 2011.
30. Partamies N., Gustavsson B., Sangalli L., Syrjasuo M., Donovan E., Connors M., Charriois D., Tomography-like approach for analyzing colour auroral images, *Geophysica*, 48(1-2), pp. 81 – 90, 2012.
31. Gustavsson B., A study of feasible tomographic inversion techniques for ALIS, IRF Technical Report 039, 37 pp., Swedish Institute of Space Physics, Kiruna, Sweden, 1992.
32. Aso T., Ejiri M., Urashima A., Miyaoka H., Ake Steen, Brandstrom U., Gustavsson B. First results of auroral tomography from ALIS-Japan multi-station observations in March 1995, *Earth Planet Space*, 50, 81 – 86, 1998.
33. Gilbert P., Iterative methods for the three-dimensional reconstruction of an object from projections, *J. Theor. Biol.*, 36, pp. 105–117, 1972.
34. Herman G. T., and Lent A., Iterative reconstruction algorithms, *Compt. Biol.*
35. Kak A. C., Slaney M., Principles of computerized tomographic imaging, IEEE Press, New York, 329 p., 1988.
36. Hart II V.P., The application of tomographic reconstruction techniques to ill-conditioned inverse problems in atmospheric science and biomedical imaging, diss. of Doctor of philosophy in physics, Utah State University, 153 p., 2012.
37. Enell C.-F., Gustavsson B., Brandstrom B.U.E., Sergienko T.I., Verronen P.T., Rydesator P., Sandahl I., Tomography-like retrieval of auroral volume emission ratios for the 31 January 2008 Hotel Payload 2 event, *Geoscience Instrum. Method Data Syst. Discuss.*, 2, pp. 1 – 21, 2012.
38. Frey S., and Frey H.U., Auroral emission profiles extracted from three dimensional reconstructed arcs, *Journ. Geophys. Res.*, V. 101, №A10, pp. 23731 – 23741, 1996.
39. Verhoeven D., Limited-data computed tomography algorithms for the physical sciences, *Appl. Opt.* – V. 32. – Pp. 3736 – 3754, 1993.
40. Natterer F. Mathematical aspects of computerized tomography, translated from English, Mir Publishers, 1990.
41. Budinger T. F., Gullberg G. T., Huesman R. H., Emission computed tomography, in *Image reconstruction from projections*, Ed. by G.T. Herman, Springer, New York. – Pp. 147 – 246.
42. Austen J. R., Franke S. J., Liu C. H., Yeh K. C., Application of computerized tomography techniques to ionospheric research, in *Radio beacon contribution to the study of ionization and dynamics of the ionosphere and correction to geodesy*, Ed. by Tauriainen, Univ. of Oulu, Finland, Part 1, 25 – 35, 1986.
43. Nygren T., Markkanen M., Lehtinen M., Kaila K., Application of stochastic inversion in auroral tomography, *Ann. Geophysicae*, 14. – Pp. 1124 – 1133, 1996.
44. Janhunen P., Reconstruction of electron precipitation characteristics from a set of multiwavelength digital all-sky auroral images. *Journ. Geophys. Res.*, V. 101 – № A9. – Pp. 18505 – 18516, 2001.
45. Hays P. B., Anger C. D., Influence of ground scattering on satellite auroral photometry. *Appl. Opt.*, V. 17. – №12. – Pp. 1898 – 1904, 1978.
46. Murphree J.S., Anger C.D., An empirical method for determining albedo contribution to satellite photometer data. *Remote Sensing of Environment*, v.9, pp183-187, 1980.
47. Avdiushev V.A. Numerical simulation of orbits. – Tomsk: Scientific and technical literature, 2010. – 284 p.
48. Steel D. P., McEwen D. J., Electron auroral excitation efficient and intensity ratios, *Journ. Geophys. Res.*, V. 95. – Pp. 10321 – 10336, 1990.
49. Bordovitsyna T. V., Avdiushev V. A. Theory of motion of the Earth's artificial satellites. Analytical and numerical methods: textbook. – Tomsk: Tomsk University Press, 2007. – 220 p.

**Aleksandr Konstantinovich Kuzmin**, Candidate of Physics and Mathematics (Ph.D.), Chief Specialist,  
tel.: +7 (495) 333-20-00, e-mail: [alkkuzmin@mail.ru](mailto:alkkuzmin@mail.ru).  
(IKI RAN).

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

**Ivan Nikolaevich Chuvashov**, Candidate of Physics and Mathematics (Ph.D.), Junior Researcher,  
tel.: +7 (3822) 529-776, e-mail: [chuvashovin@gmail.com](mailto:chuvashovin@gmail.com).  
(National Research Tomsk State University).

**Grigori Mikhailovich Kruchenitskii**, Doctor of Physics and Mathematics (D.Sc.), Head of Department,  
tel.: +7 (495) 408-61-41, e-mail: [omd@cao-rhms.ru](mailto:omd@cao-rhms.ru).

**Iurii Nikolaevich Potainin**, Candidate of Physics and Mathematics (Ph.D.), Senior Researcher,  
tel.: +7 (495) 408-61-72, e-mail: [omd@cao-rhms.ru](mailto:omd@cao-rhms.ru).

(Federal State-Funded Institution Central Aerological Observatory of Roshydromet).