



**УДК 523.44; 531.3; 532.546; 533.6; 539.3**  
**ББК 22.251; 22.253; 22.62**

**Ф 947** **Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики (ФППСМ-2016): Сборник трудов IX всероссийской научной конференции, 21-25 сентября 2016 года, г. Томск. – Томск: Томский государственный университет, 2016. – 502 с.: ил.**

ISBN 978-5-94621-334-9

Сборник содержит материалы IX Всероссийской научной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики», посвященной 55-летию полета Ю. А. Гагарина, прошедшей в г. Томске 21 – 25 сентября 2016 года.

Сборник включает в себя научные работы отражающие современные достижения в области воспламенения и горения конденсированных систем; внутренней и внешней баллистике; динамических и комплексных задач механики деформируемого твердого тела; газодинамике многофазных течений в технических устройствах; динамике полета и небесной механике; теплообмену и гидроаэромеханике; вычислительных технологий.

Для специалистов в области газовой динамики, механике твердого деформируемого тела, небесной механике, математического моделирования и вычислительных технологий, аспирантов и студентов старших курсов технических вузов и факультетов.

ISBN 978-5-94621-334-9

© Научно-исследовательский институт  
прикладной математики и механики  
ТГУ, 2016

# НЕКОТОРЫЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ КОРРЕЛЯЦИЙ ИОНОСФЕРНЫХ СЦИНТИЛЛЯЦИЙ СИГНАЛОВ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ В ПОЛЯРНЫХ ОБЛАСТЯХ С ВЫСЫПАНИЯМИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И АВРОРАЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ

М.А.Баньщикова<sup>1</sup>, И.Н.Чувашов<sup>1</sup>, А.К.Кузьмин<sup>2</sup>, Г.М.Крученицкий<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики ТГУ  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, стр. 27  
E-mail: [mba-tomsk@mail.ru](mailto:mba-tomsk@mail.ru), [chuvashovin@gmail.com](mailto:chuvashovin@gmail.com)

<sup>2</sup>ФГБУН Институт космических исследований Российской академии наук  
117997, г. Москва, ул. Профсоюзная 84/32  
E-mail: [alkkuzmin@mail.ru](mailto:alkkuzmin@mail.ru)

<sup>3</sup>Центральная аэрологическая обсерватория (ЦАО Росгидромет),  
141700, МО, г.Долгопрудный, ул. Первомайская, д.3,  
E-mail: [omd@cao-rhms.ru](mailto:omd@cao-rhms.ru)

**Введение.** Динамичные высыпания заряженных частиц в авроральном овале и полярной шапке во время суббурь и их электродинамические следствия (градиенты электронной концентрации, продольные токи, градиенты поперечных проводимостей) порождают неоднородности в ионосферной плазме. Прямыми индикаторами высыпаний частиц в различных секторах MLT на разных стадиях магнитосферных суббурь являются разнообразные структуры эмиссий полярных сияний различных масштабов. Распределения интенсивности свечения конкретных авроральных эмиссий с разной степенью точности отражают энергетические характеристики высыпающихся частиц [1]. Изображения этих распределений могут получаться как с поверхности Земли, так и с орбиты [2]. Радиосигналы (на пути от передатчика на навигационном спутнике до приемника на Земле), при протыкании возмущенной ионосферы испытывают сцинтилляции. Корреляционный анализ локаций сцинтилляций сигналов от навигационных спутников GPS, GLONASS и др. на разных частотах показывает весьма сложную связь с интенсивностью эмиссий в мелкомасштабных авроральных дугах и пятнах в полярной шапке, наблюдаемых с Земли. Обзор этих работ был представлен в [3].

Данная работа посвящена некоторым методическим аспектам анализа изображений авроральных эмиссий, которые получены со станции Южный полюс в [4] одновременно с локацией и измерениями сцинтилляций сигналов навигационных спутников, на которые мы посчитали необходимым обратить внимание в преддверии готовящегося орбитального эксперимента с гелиогеофизическим комплексом аппаратуры на борту КА Метеор-МП, нацеленным на исследования процессов в магнитосферно-ионосферной системе и их влияния на распространение сигналов в ионосфере [3].

Суть работы: 1. Т.к. в перспективном орбитальном эксперименте намечено получение распределений интенсивности эмиссий:  $\lambda 630$  нм и  $\lambda 427,8$  нм в угле поля зрения  $2\omega=30^\circ$ , то

предусматривается получение карт отношений интенсивностей I630/I427,8, которое функционально связано со средней энергией электронов  $E_{cp}^e$  [1], высыпающихся из ближней магнитосферы, и карт потока энергии электронов  $F_e$  в максимуме E-слоя ионосферы распределению интенсивности эмиссии  $\lambda 427,8$  нм, а, в конечном счете, на выяснение влияния этих характеристик на распространении сигналов навигационных систем.

2. Учитывая, что высота эмиссии  $N_2^+$  ( $\lambda 427,8$  нм)  $h=100$  км близка к высоте кислородной эмиссии  $\lambda 557,7$  нм ( $\sim 115-120$  км) см. рис. 4 в [5], наблюдаемой со станции Южный Полюс, мы решили проверить, как повлияет сопряжение по магнитному полю геометрически «соосных» элементов изображений каналов аврорального имаджера, регистрирующих пространственное распределение отношения интенсивностей эмиссий, если будем их сравнивать с отношением I630/I557,7, которое также функционально связано с  $E_{cp}^e$  [1].

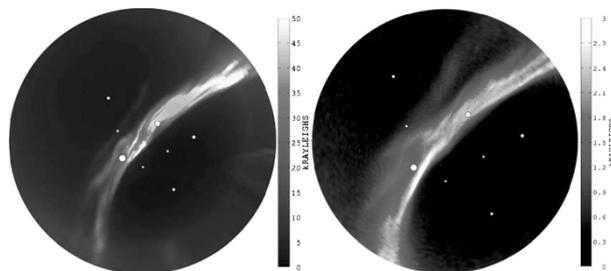


Рис. 1. Пример All-sky изображений  $\lambda 557,7$  нм на высоте 120 км (слева) и  $\lambda 630,0$  нм на высоте 200 км (справа), полученные со станции Южный полюс [4]. Справа от изображений приведены шкалы абсолютной интенсивности эмиссий в Рэлеях

На первом этапе работы было проведено масштабирование и совмещение, опубликованных в условных цветах в [4], четырех пар All-sky изображений авроральных эмиссий  $\lambda 557,7$  и  $\lambda 630,0$  нм. Для примера на рис. 1 представлена только одна пара изображений, обозначенная «d» в [4], полученных в 20.37.45 и 20.37.33 UT 09.08.2010 г. на станции Южный полюс на высотах 120 и 200 км соответственно. Пример результатов

их анализа приводится на рис. 3, 4. На рис. 1 белые точки маркируют места протыкания авроральных структур сигналами GPS [4], в которых наблюдались фазовые сцинтилляции в конкретные моменты времени близкие к моментам экспозиций.

**1. Алгоритм идентификации элементов изображений.** Для идентификации элементов в изображениях в первую очередь необходимо было определить масштаб изображения и размер каждого элемента. Учитывая, что изображения получены с поверхности Земли прибором с углом поля зрения близким к  $180^\circ$  на заданной высоте, схему определения размера элемента можно представить рисунком 2. Размер оцифрованных изображений составляет  $586 \times 586$  элементов. Для определения размера изображения вычисляем длину дуги  $L$  окружности (Рис. 3) как

$$L = 2\alpha(R + H)\pi/180,$$

где  $H$  – высота изображения над поверхностью Земли радиуса  $R = 6378137$  м. Угол  $\alpha$  определяется из соотношения

$$\frac{R}{\sin \gamma} = \frac{R + H}{\sin(180 - \beta)}, \quad (1)$$

$\gamma = \pi - (\pi - \beta) - \alpha$ , где угол поля зрения прибора равен  $2 \cdot \angle \beta$ , отсюда следует, что  $\alpha = \beta - \gamma$ . Из (1) получаем

$$\alpha = \beta - \arcsin\left(\frac{R \sin \beta}{R + H}\right).$$

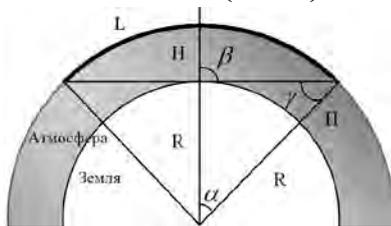


Рис.2. Схема вычисления длины дуги на высоте изображения

Размер элемента равен отношению длины дуги к количеству элементов по(ширине/длине) изображения. В нашем случае размер элемента изображения (Рис. 1), полученного на высоте 120 км равен 4268,7 м, а элемента изображения на высоте 200 км – 5550,3 м.

**2. Отношение интенсивностей для каждого элемента изображений эмиссий.** Теперь зная масштаб и ориентацию каждого изображения (верх – это направление на Гринвичский меридиан) и, считая, что центр изображений совпадает с координатами станции Южный полюс, выполним следующие действия: определим координаты каждого элемента относительно центра изображения; вычислим координаты элементов в геоцентрической системе координат; перейдем к геомагнитной системе координат; проведем трассирование вдоль геомагнитной силовой линии от каждого элемента изображения  $\lambda 557,7$  нм до элемента изображения  $\lambda 630$  нм.

Из-за отклонения от нормали и кривизны магнитных силовых линий (м.с.л.) вычислять отношение интенсивностей разновысотных эмиссий

при их геометрическом наложении физически неверно, т.к. высыпания частиц происходят вдоль м.с.л. Поэтому вычисляем матрицы сопряжений по м.с.л. всех элементов изображений  $\lambda 557,7$  и  $\lambda 630$ .

Повторив действия в обратном порядке 3, 2, 1 для изображения  $\lambda 630$ , проведем идентификацию элементов и расчет их сопряжений вдоль м.с.л. с элементами изображения  $\lambda 557,7$ . Для обратного перехода на шаге 3 изображения были предварительно повернуты на угол запаздывания, который возникает из-за вращения Земли вследствие отличия моментов экспозиции изображений на известный интервал времени.

**3. Трассирование вдоль магнитной силовой линии.** Для построения матриц сопряжений всех элементов изображений эмиссий, полученных с разных высот, мы использовали процедуру трассирования, построенную на основе модели геомагнитного поля IGRF NASA, и пакета программ GEOPACK-2008 Н.А. Цыганенко [6].

Трассирование вдоль силовой линии магнитного поля выполнялось путем численного интегрирования системы дифференциальных уравнений

$$\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial s} = \frac{\mathbf{V}}{|\mathbf{B}|} = \mathbf{b}, \quad (2)$$

при условии, что касательная к каждой точке на силовой линии параллельна магнитному полю в той же самой точке. В уравнении (2)  $\mathbf{r}$  – вектор положения точки пространства относительно центра Земли,  $s$  – длина дуги вдоль м.с.л.,  $\mathbf{V}$  – вектор магнитного поля,  $\mathbf{b} = \mathbf{V}/|\mathbf{B}|$  – единичный вектор параллельный м.с.л. Система уравнений (2) решалась численно методом Рунге-Кутты-Мерсона.

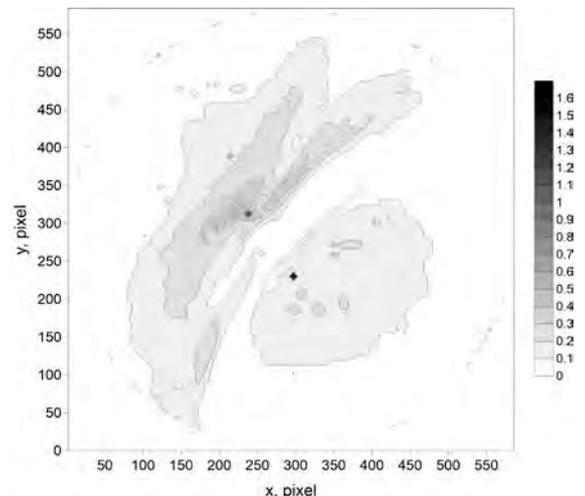


Рис. 3. Наложение друг на друга карт отношений интенсивности  $I_{630}/I_{557,7}$  (см. текст)

**4. Анализ численных результатов.** В результате моделирования для изображений рисунка 1 были получены следующие результаты: **1)** Построены карты отношений интенсивностей  $I_{557,7}$  нм и  $I_{630,0}$  нм в геометрическом сопряжении, когда элементы изображений находятся друг над другом. Как показали результаты, большая часть значений отношений интенсивностей не превышает 0,5. **2)** Построены карты отношений интенсивностей

1557,7 нм I630,0 нм после процедуры трассирования вдоль м.с.л. Визуально отличия этих карт почти не заметны (в тексте карты не показаны), но после наложения карт друг на друга виднеется незначительное изменение контуров равного отношения интенсивности с небольшим сдвигом (рис. 3) от 1 до 8 элементов, что соответствует расстояниям от ~5.5 до ~44.4 км на высоте свечения эмиссии  $\lambda 630$  нм. Как и следовало ожидать, сопряжение разновысотных изображений по магнитному полю изменяет пространственную картину отношения интенсивностей разновысотных эмиссий по сравнению с той, которая получается при их геометрическом наложении. 3) На рис. 4 представлена увеличенная центральная часть изображений. Видно, что после процедуры трассирования происходит смещение элементов по осям. Для выбранной пары изображений смещение составило по оси X на 4 элемента, а по оси Y на 6 элементов, что соответствует ~22.2 км и ~33.3 км. Такие расстояния могут быть соизмеримы, а могут и значительно превосходить минимальный поперечный размер авроральных структур и «темных» промежутков между ними [2].

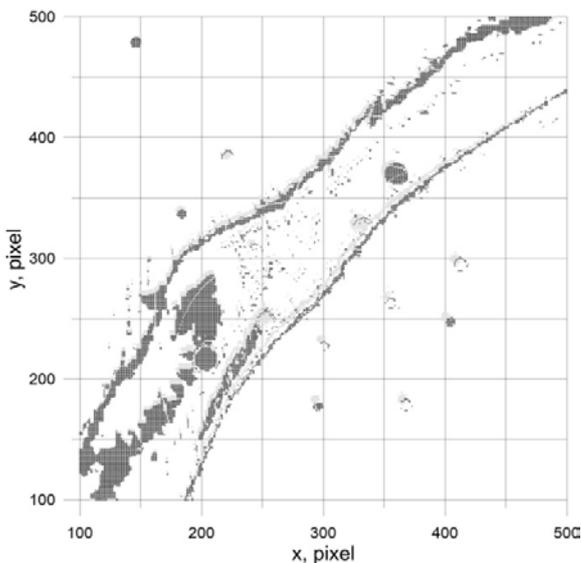


Рис. 4. Наложение изображений интенсивности 1557,7 нм на высоте 120 км (серые точки) и интенсивности I630,0 нм на высоте 200 км (черные точки) после процедуры трассирования

Согласно [1], как следствие, изменяется распределение средней энергии электронов (функционально связанных с отношением интенсивности эмиссий), как минимум на несколько десятков эВ, по сравнению с распределением  $E_{cp}^e$ , рассчитанным по отношению интенсивностей эмиссий взятых при их геометрическом наложении. Такое отличие средней энергии высыпавшихся электронов может существенно повлиять на условия распространения сигнала и изменение индекса фазовых сцинтилляций при пересечении авроральных структур разных масштабов.

**Заключение.** Сопряжение элементов разновысотных изображений по магнитному полю уточняет пространственную картину отношения

интенсивностей разновысотных эмиссий от той, которая получается при их геометрическом наложении, что, в конечном счете, приведет к существенному уточнению  $E_{cp}$ , рассчитываемой на основе отношений.

Результаты проработок рассмотренных аспектов нацелены в перспективе на уточнение локаций конкретных элементов изображений разновысотных эмиссий при их сопряжении по магнитному полю с помощью ц.м. КА, что позволит более корректно дистанционно (с орбиты) картографировать энергетические характеристики высыпавшихся частиц (при решении обратной задачи). При этом результаты измерений энергетических характеристик частиц непосредственно на спутнике Метеор-МП будут сопоставляться (при решении прямой задачи) с характеристиками, полученными дистанционно, в подножной точке магнитной силовой линии, положение которой будет рассчитываться в каждом изображении авроральных эмиссий на соответствующих высотах. Детальный корреляционный анализ позиций ионосферных сцинтилляций с распределениями  $E_{cp}^e$  высыпавшихся электронов, их потока энергии, градиентов  $N_e$ , создаваемых в максимуме E-области, и градиентов поперечных проводимостей ионосферы, вычисленными на основе изображений авроральных эмиссий. Мы уверены, что описанная методика уточнения  $E_{cp}^e$  позволит приблизить выяснение причинно-следственных связей сцинтилляций радиосигналов, проходящих через структуры полярных сияний.

#### Литература

1. Козелов Б.В., Иванов В.Е., Сергиенко Т.И. Вариации интенсивности эмиссий полярных сияний в области совместных высыпаний электронов и протонов: возможности диагностики параметров потоков частиц // Геомагн. Аэроном., Т. 42, № 4, С. 513–518, 2002.
2. Кузьмин А.К. Спектрофотометрическая диагностика характеристик авроральной ионосферы с орбит перспективных российских космических аппаратов. Препринт ИКИ РАН, Пр-2161, 49 с., 2011. <http://new.cosmos.ru/sites/default/files/books/2011kuzmin.pdf>
3. Кузьмин А.К., Баньшикова М.А., Доброленский Ю.С., Крученицкий Г.М., Маслов И.А., Мерзлый 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. ИКИ РАН «Практические аспекты гелиогеофизики», стр. 114-133, 2016. (<http://iki.cosmos.ru/books/2016gelioph.pdf>)
4. Kinrade J., Mitchell C.N., Smith, N.D., Ebihara Y., Weatherwax A.T., Bust G.S. GPS phase scintillation associated with optical auroral emission: First statistical result from the geographic South Pole // Journal of Geophysical Research: Space Physics, Vol. 118, 2490-2502, 2013.
5. Dashkevich Zh.V., Ivanov V.E., Khudukon B.Z. Features of stable diffuse arcs observed by means of auroral arcs tomography. Ann. Geophys., 25, pp.1131-1139, 2007.
6. Tsyganenko, N.A., "Magnetic Field Model, FORTRAN Routines, Geopack2008", <http://geo.phys.spbu.ru/~tsyganenko/modeling.html>, <http://geo.phys.spbu.ru/~tsyganenko/Geopack-2008.html>

<i>Кисловский В. А., Звезгинцев В. И.</i> Аэродинамические характеристики осесимметричного летательного аппарата в сверхзвуковом потоке при наличии поперечной газовой струи .....	325
--	-----

#### СЕКЦИЯ 6. Динамика полета и небесная механика

<i>Александрова А.А., Чувашов И.Н., Бордовицына Т.В.</i> Численно-аналитическая методика построения по данным измерений аппроксимации эффективной поверхности ИСЗ .....	328
<i>Александрова А.А., Чувашов И.Н.</i> Модель светового давления для навигационных спутников ГЛОНАСС .....	331
<i>Баранников Е.А., Черницов А.М., Тамаров В.А., Сюсина О.М., Самбаров Г.Е.</i> Оценивание способов построения весовых матриц в задаче вероятностного исследования движения астероидов .....	334
<i>Батурин А.П.</i> Исследование способа построения разброса возможных решений при улучшении орбит астероидов .....	337
<i>Галушина Т.Ю., Александрова А.Г.</i> Исследование динамической эволюции потоков частиц, образовавшихся в результате распада астероидов, сближающихся с Землей .....	339
<i>Гордиенко Е.С., Ивашкин В.В.</i> Выведение космического аппарата на высокие орбиты искусственного спутника Луны с использованием схемы трехимпульсного перехода .....	342
<i>Ивашкин В.В., Лан Аньци</i> Исследование орбитального движения спутника астероида Апофис .....	345
<i>Ивашкин В.В., П. Гуо</i> Анализ параметра MEGNO для орбитального движения космического аппарата вокруг астероида Апофис .....	348
<i>Самбаров С.Е., Сюсина О.М.</i> Исследование вероятностной модели движения астероидов, сближающихся с землей .....	351
<i>Сюсина О.М.</i> Исследование нелинейности задач оценивания потенциально опасных астероидов, наблюдавшихся в одной оппозиции .....	354
<i>Томилова И.В.</i> Особенности структуры вековых резонансов и орбитальная эволюция неуправляемых объектов ГНСС .....	357
<i>Баньщикова М.А., Чувашов И.Н., Кузьмин А.К., Крученицкий Г.М.</i> Некоторые методические аспекты исследований корреляций ионосферных скинтилляций сигналов навигационных систем в полярных областях с высыпаниями заряженных частиц и авроральной структурой .....	360
<i>Чувашов И.Н., Левкина П.А.</i> Определение орбит объектов космического мусора .....	363

#### СЕКЦИЯ 7. Теплообмен и гидроаэромеханика

<i>Агафонцев М.В., Лобода Е.Л., Матвиенко О.В., Рейно В.В.</i> Оценки масштабов турбулентности в диффузионных пламенах с применением термографии .....	366
<i>Бессонова М.П.</i> Заполнение вертикального канала вязкой жидкостью в поле силы тяжести .....	369