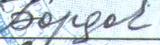


Министерство образования и науки Российской Федерации  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)  
Физический факультет  
Кафедра астрономии и космической геодезии

УДК: 521.3, 004

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ В ГЭК

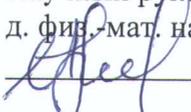
Руководитель ООП  
д-р физ.-мат. наук, профессор  
 Т.В. Бордовицына  
« 8 » ~~сентября~~ 2018 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ  
КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА АВРОВИЗОР-ВИС/МП НА КА МЕТЕОР-МП

по основной образовательной программе подготовки магистров  
направление подготовки 09.04.02 Информационные системы и технологии

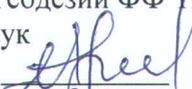
Баньщикова Мария Александровна

Научный руководитель ВКР  
д. физ.-мат. наук,  
 В. А. Авдюшев

« 08 » 06 2018 г.

Автор работы  
студент группы № 5276  
 М.А. Баньщикова

Министерство образования и науки Российской Федерации  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)  
Физический факультет  
Кафедра астрономии и космической геодезии

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
астрономии  
и космической геодезии ФФ ТГУ,  
д-р физ.-мат. наук  
Авдюшев В. А.   
«15» сентября 2016 г.

### ЗАДАНИЕ

по подготовке ВКР магистранта студенту Банышиковой М. А. группы № 5276

1. Тема ВКР «РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА АВРОВИЗОР-ВИС/МП НА КА МЕТЕОР-МП».
2. Срок сдачи студентом выполненной ВКР: июнь 2018 г.
3. Исходные данные к работе:
  - программы Кадр-1, 2, 3, 4, разработанные в 70-80 годы XX века.
  - Гальперин Ю.И., Пономарев Ю.Н., Сеницын В.М. Некоторые алгоритмы расчета справочной геофизической информации вдоль орбит околоземных спутников. Препринт ИКИ РАН. 1980. 45 с.
4. Краткое содержание работы:  
Программный комплекс «Вектор-М» разрабатываемый совместно с ИКИ РАН и ЦАО Росгидромет, должен прийти на смену программам Кадр-1, 2, 3, 4, реализованных в 70-е и 80-е годы. Данное ПК, предназначено для расчета прогнозируемого и фактического положения центра масс КА Метеор-МП на орбите, сопутствующих (вдоль орбиты) географических, геофизических, геомагнитных, астрономических параметров, а также этих параметров для векторов наблюдений из точки центра масс в рамках полей зрения с учетом идеальной или текущей ориентации строительных осей КА, на заданную высоту свечения атмосферных эмиссий, наблюдаемых в эксперименте с прибором «Авровизор-ВИС/МП» на КА Метеор-МП.
5. Организации, по заданию которых выполнялась работа: Томский государственный университет (ТГУ), Институт Космических Исследований (ИКИ РАН).
6. Графический материал: 40 рисунков.
7. Дата выдачи задания: 15 сентября 2016 г.

Руководитель ВКР,  
Д-р физ.-мат. наук

Задание принял к исполнению  
студентка группы № 5276


Авдюшев В. А.

Банышикова М. А.

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа «РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА АВРОВИЗОР-ВИС/МП НА КА МЕТЕОР-МП» состоит из 54 страниц печатного текста, 40 рисунков, 9 таблиц и 35 источников использованной литературы.

Ключевые слова: программное обеспечение, космический эксперимент, Метеор-МП, Зонд, авроральный имаджер.

Объектом исследования является движение космических аппаратов Метеор-МП и Зонда в приполярных зонах.

Цель работы – создать оболочку программы на языке Делфи для численного моделирования движения космического аппарата, исследования его движения, в частности построения эфемерид, трассирования вдоль геомагнитных силовых линий, определения пересечения зон видимости двух космических аппаратов, а также визуализации трасс спутников при учете различных условий (одновременное нахождение на теневом участке орбиты, учет пересечения зон видимости и одновременное нахождение КА в выбранных широтах, учет ориентации спутника относительно Солнца).

В результате было разработано ПО для исследования движения ИСЗ, вычисления сопутствующей геофизической и астрономической задачи для центра масс космического аппарата, нахождения пересечений зон видимости двух КА в области тени в полярных и в приполярных зонах, возможностью трассирования вдоль магнитных силовых линий, и визуализацией процесса.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1. Системы координат. Координатные преобразования.....	4
2. Численная модель движения космических аппаратов.....	9
2.1 Уравнения движения.....	9
2.2 Модели возмущающих сил .....	9
2.3 Анализ возмущающих сил для Метеор-МП.....	12
3. Трассирование вдоль силовой линии геомагнитного поля.....	14
3.1 Модель геомагнитного поля IGRF Model .....	14
3.2 Модели геомагнитного поля Цыганенко .....	15
3.3 Трассирование вдоль силовой линии магнитного поля. Процедура TRACE.....	16
3.4 Алгоритм расчета матриц сопряжений изображений по магнитной силовой линии .....	16
4. Вычисление сопутствующей геофизической и астрономической информации для центра масс КА Метеор-МП.....	19
5. Алгоритм вычисления границ аврорального овала .....	24
6. Расчет прогноза Ситуаций .....	26
6.1 Вычисление моментов одновременного пересечения окрестности одной и той же магнитной силовой линии .....	26
6.2 Расчет ситуаций пролета КА над окрестностью заданных точек на Земле.....	26
7. Расчет матриц сопряжений изображений авроральных эмиссий по магнитной силовой линии полученных с наземных станций .....	28
8. Модель наблюдения авроральными имаджерами эмиссий в одной и той же авроральной структуре с разных ракурсов с разных орбит и с поверхности Земли.....	32
8.1 Описание космического эксперимента .....	32
8.2 Орбиты КА Метеор-МП и Зонд. Модель движения КА.....	33
8.3 Критерий и формулы расчета теневой стороны орбиты и засветки от Луны .....	33
8.4 Определение зоны общей видимости с космических аппаратов с учетом ориентации КА Зонд на Солнце.....	34
8.5 Численные результаты.....	37
9. Использование БД в проекте «Вектор-М».....	40
Заключение .....	41
Список литературы .....	42
Приложение 1. Блок-схема программного обеспечения «Вектор-М» .....	45
Приложение 2. Сравнительное испытание эскизного варианта диалоговой программы расчетов навигационных и некоторых геофизических параметров «Вектор-М» по одним и тем же начальным условиям орбиты КА «ИК-Болгария-1300».....	47
Приложение 3 Интерфейс ПК Вектор-М.....	49

## Введение

С развитием и реализацией новых идей и методик по дистанционной диагностике энергетических характеристик земной ионосферы с орбит КА, появлением новых высокочувствительных детекторов изображений, разработкой новых бортовых средств и технологий передачи информации на Землю в последнее время стремительно повышается информативность и точность получаемых с орбит КА научных данных. Вследствие этого повышаются требования к программному обеспечению как для сопровождения при управлении экспериментами и повышения их эффективности, так и для обработки и анализа данных научных измерений в научных и мониторинговых орбитальных экспериментах. Новое ПО должно обеспечивать не только оперативность расчета прогнозов орбит и геофизических условий в заданной геометрии наблюдений необходимых для оперативного управления экспериментами, но и отвечать соответствующей точности самих данных измерений.

Программный комплекс «Вектор-М» разрабатываемый в отделе небесной механики и астрометрии НИИ ПММ ТГУ совместно с ИКИ РАН и ЦАО Росгидромет, должен прийти на смену программам Кадр-1, 2, 3, 4 [1, 2], реализованных в 70-е и 80-е годы. Данное ПК разрабатываемое в рамках проекта Метеор-МП, предназначено для расчета прогнозируемого и фактического положения центра масс КА Метеор-МП на орбите, сопутствующих (вдоль орбиты) географических, геофизических, геомагнитных, астрономических параметров, а также этих параметров для векторов наблюдений из точки центра масс в рамках полей зрения с учетом идеальной или текущей ориентации строительных осей КА, на заданную высоту свечения атмосферных эмиссий, наблюдаемых в эксперименте с прибором «Авровизор-ВИС/МП» на КА Метеор-МП.

Данный вариант программы работает до высот порядка  $60 R_E$  и для углов наклона плоскости орбиты более 90 град. Насколько нам известно, в СССР и России не было ни одной подобной программы, которая бы работала для таких углов наклона (в основном до 89 град.). Следует отметить, что данную программу можно развивать и дальше для более высоких высот (Вектор-М2), используя другие модели магнитного поля.

Работа состоит из 9 глав. Каждая глава это отдельная задача и отдельный блок ПО Вектор-М. В приложения вынесены блок-схема ПО, испытания проекта и сравнение результатов с Кадр-3, а также скриншоты интерфейса ПК Вектор-М.

Результаты по проекту были опубликованы в высокорейтинговых журналах и представлены на нескольких конференциях всероссийского и международного уровня (см. список литературы).

## 1. Системы координат. Координатные преобразования

В решении задач связанных со спутниковым движением используются различные системы координат (СК). Для вычисления орбит спутников, прогнозирования их движения применяют, как правило, неподвижные системы координат. Для определения координат пунктов в процессе наблюдений используются системы, вращающиеся вместе с Землей. А для использования полученных координат при решении различных прикладных задач могут потребоваться самые разнообразные системы и координатные преобразования между ними.

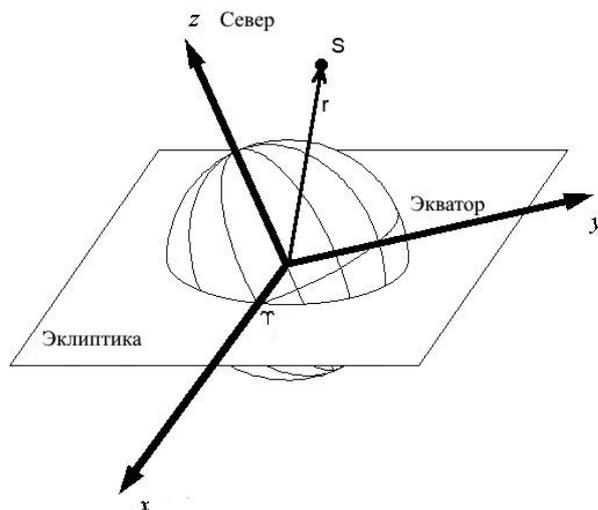


Рисунок 1.1 — Международная инерциальная система координат

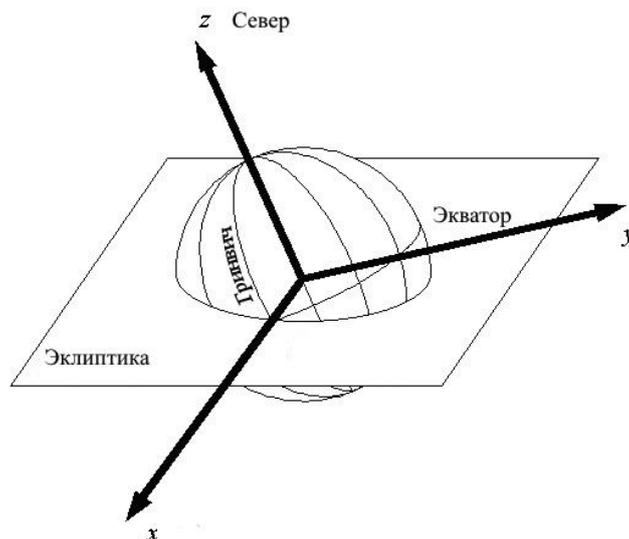


Рисунок 1.2 — Международная земная система координат

### Абсолютные координаты

Абсолютные координаты задаются в земной инерционной системе координат (рисунок 1.1), в которой координаты определяются как расстояния от начала вдоль трех ортогональных (взаимно-перпендикулярных) осей. Ось  $Z$  направлена вдоль оси вращения Земли, указывая на север, ось  $X$  направлена в точку весеннего равноденствия  $\gamma$  и ось  $Y$  дополняет две предыдущие до правосторонней ортогональной системы. Как отмечено на рисунке 1.1, точка весеннего равноденствия  $\gamma$  находится в направлении линии пересечения экваториальной плоскости Земли и эклиптики. Эти три оси, определяющие геоцентрическую инерциальную систему координат, фиксированы в пространстве и не вращаются вместе с Землей. Эта система наиболее подходит для изучения движения искусственных спутников Земли (ИСЗ). Положение объекта в небесной системе можно задать либо сферическими координатами – прямым восхождением  $\alpha$  и склонением  $\delta$  либо прямоугольными координатами  $(x, y, z)$ . Прямоугольные координаты являются компонентами вектора положения  $\mathbf{X}_{\text{ICRF}} = (x, y, z)^T$ . При задании положения спутника в этой системе вводится геоцентрическое расстояние  $r = |\mathbf{X}|$ .

### Гринвичские координаты

Гринвичские координаты задаются в международной земной системе координат. Началом отсчета является центр масс Земли. Система вращается вместе с Землей и не является инерциальной (рисунок 1.2). Ориентация осей определяется из наблюдений. Ось  $Z$  является средней осью вращения Земли и направлена в опорный полюс. Ось  $X$  лежит в плоскости опорного меридиана и направлена на гринвичский меридиан.

Переход к инерциальной системе координат осуществляется по формуле:

$$\mathbf{X}_{ICRF} = [\mathbf{ABCD}]^T \mathbf{X}_{ITRF}, \quad (1.1)$$

где  $\mathbf{X}_{ITRF}$  – координаты в земной системе координат;  $[\mathbf{ABCD}]^T$  – произведение матриц: матрица  $\mathbf{A}$  задает движение полюса, матрица  $\mathbf{B}$  осуществляет преобразование инерциальной системы истинной даты во вращающуюся систему истинной даты,  $\mathbf{C}$  – матрица нутации,  $\mathbf{D}$  – матрица прецессии (вычисление матриц  $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}$  можно найти в работе [1]).

### Оскулирующие элементы

Оскулирующие элементы орбиты – это шесть элементов орбиты, определяющие положение небесного тела в пространстве в задаче двух тел: большая полуось ( $a$ ), эксцентриситет ( $e$ ), наклонение ( $i$ ), долгота восходящего узла ( $\Omega$ ), аргумент перицентра ( $\omega$ ), средняя аномалия ( $M_0$ ). Первые два элемента определяют форму орбиты, третий, четвертый и пятый — ориентацию плоскости орбиты по отношению к базовой системе координат, шестой — положение тела на орбите (рисунок 1.3). Переход между оскулирующими элементами и прямоугольными координатами  $\mathbf{X}_{ICRF}$  осуществляется по следующим формулам [1]:



Рисунок 1.3 — Оскулирующие элементы орбиты

$$M = n(t - t_0) + M_0,$$

$$E - e \sin E = M,$$

$$\tan \frac{v}{2} = \sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \tan \frac{E}{2},$$

$$r = \frac{a(1-e^2)}{1+e \cos v}, \quad (1.2)$$

$$u = v + \omega,$$

$$x = r(\cos u \cos \Omega - \sin u \sin \Omega \cos i),$$

$$y = r(\cos u \sin \Omega + \sin u \cos \Omega \cos i),$$

$$z = r \sin u \sin i.$$

Здесь  $M$  – средняя аномалия,  $E$  – эксцентрическая аномалия,  $v$  – истинная аномалия,  $u$  – аргумент широты, а второе уравнение системы (1.2) – уравнение Кеплера.

### Гелиоцентрические координаты

Гелиоцентрические координаты, заданные в инерциальной системе координат с началом координат находящимся в центре масс Солнца. Переход осуществляется следующим образом:

$$\mathbf{X}_{ICRF}^{GELIO} = \mathbf{X}_{ICRF}^{EARTH} + \mathbf{X}_{ICRF}^{GEO}, \quad (1.3)$$

где  $\mathbf{X}_{ICRF}^{GELIO}$  – искомые координаты небесного тела в гелиоцентрической системе координат,  $\mathbf{X}_{ICRF}^{EARTH}$  – координаты Земли в гелиоцентрической системе координат,  $\mathbf{X}_{ICRF}^{GEO}$  – координаты небесного тела в геоцентрической системе координат. Для вычисления координат Земли в гелиоцентрической системе координат используются эфемериды фонда больших планет DE405 [3].

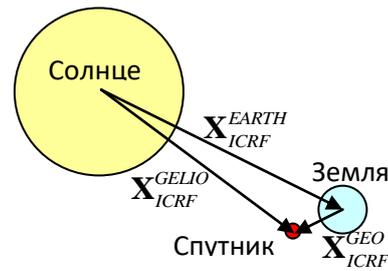


Рисунок 1.4 — Переход к гелиоцентрическим координатам

### Эклиптические координаты

В эклиптической системе координат главной плоскостью является проекция на небесную сферу плоскости земной орбиты (плоскость эклиптики), а основной осью отсчета – прямая, проведенная из начала координат в точку весеннего равноденствия  $\gamma$  (прямая ЭЭ' на рисунке 1.4). Пересечение плоскости земной орбиты с небесной сферой – это большой круг, по которому Солнце перемещается в течение года, что является отображением годичного обращения Земли вокруг Солнца.

Эклиптическая широта светила  $Q$  – это его угловое расстояние от эклиптики, положительное к северу и отрицательное к югу (рисунок 1.5). Она обозначается буквой  $\beta$ .

Точкой отсчета на эклиптике является точка весеннего равноденствия  $\gamma$ . Дуга эклиптики от точки весеннего равноденствия  $\gamma$  до точки пересечения с кругом широт светила  $Q$ , отсчитываемая в направлении, противоположном суточному вращению небесной сферы, т.е. к востоку, называется эклиптической долготой светила. Переход от инерциальной системы координат к эклиптической можно записать в следующем виде

$$\mathbf{X}_{ECL} = \mathbf{R}_X(90^\circ - \lambda_{SUN})\mathbf{X}_{ICRF},$$

$$\mathbf{R}_X = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix},$$

где  $\mathbf{X}_{ECL}$  – координаты небесного тела в эклиптической системе координат,  $\lambda_{SUN}$  – эклиптическая долгота Солнца, а  $\mathbf{R}_X(90^\circ - \lambda_{SUN})$  – матрица поворота относительно оси  $OX$  на угол  $(90 - \lambda_{SUN})$ .

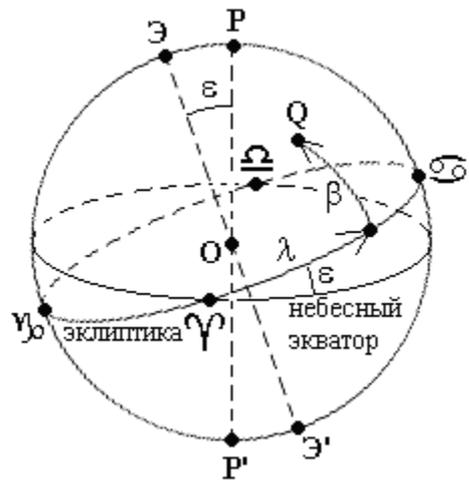


Рисунок 1.5 — Эклиптическая система координат

## Географические координаты

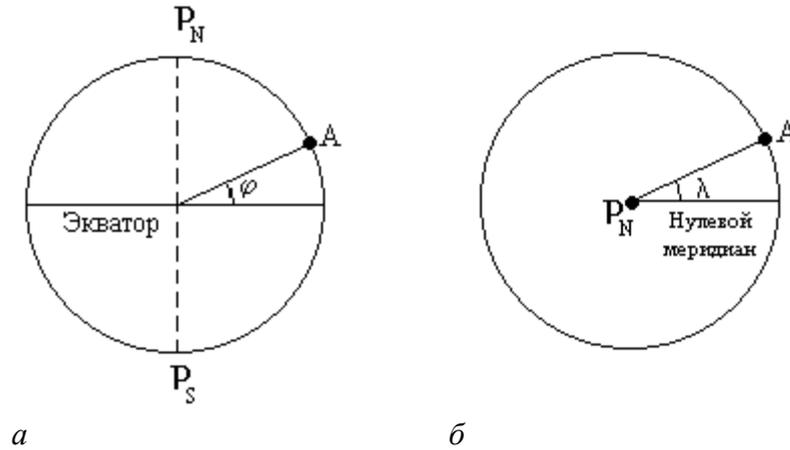


Рисунок 1.6 — Географические координаты

Географические координаты – это сферические координаты на небесной сфере привязаны к международной земной системе координат (рисунок 1.6). Географическая широта  $\varphi$  точки  $A$  на поверхности Земли – это угол между плоскостью земного экватора и радиусом, проведенным к точке  $A$  (рисунок 1.6 а),  $\varphi$  считается положительной к северу от экватора (северное полушарие) и отрицательной – к югу (южное полушарие). Линии, на которых лежат точки с равными широтами, называются географическими параллелями. Линии пересечения земной поверхности с плоскостями, содержащими земную ось, называются географическими меридианами. Угол между меридианом, проходящим через точку  $A$ , и нулевым меридианом (Гринвичский меридиан), называется географической долготой и обозначается буквой  $\lambda$  (рисунок 1.6 б).

Переход от абсолютных координат к географическим осуществляется в два этапа. На первом этапе переходим от абсолютных координат к гринвичским (1.1). Далее по формулам:

$$\varphi = \operatorname{atan} \left( \frac{Z_{ITRF}}{\sqrt{X_{ITRF}^2 + Y_{ITRF}^2}} \right), \quad (1.4)$$

$$\lambda = \operatorname{atan} \left( \frac{Y_{ITRF}}{X_{ITRF}} \right)$$

переходим к географическим координатам. Но так как наша Земля имеет форму эллипсоида, а не сферы, то формула для вычисления  $\varphi$  изменится:

$$\varphi = \operatorname{atan} \left( \frac{Z_{ITRF} + aCe^2 \sin \varphi}{\sqrt{X_{ITRF}^2 + Y_{ITRF}^2}} \right),$$

где  $C = \frac{1}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}}$ ,  $e^2 = 2f - f^2$ ,  $f$  – коэффициент сжатия Земли,  $a$  – большая полуось

Земли. Два последних параметра зависят от выбранной модели геоида.

## Геомагнитные координаты

Геомагнитные координаты определяют положение точки на земной поверхности при рассмотрении явлений земного магнетизма. Широта  $\Phi$  – угловое расстояние от геомагнитного экватора (в плоскости геомагнитного меридиана) до рассматриваемой точки; долгота  $L$  – двугранный угол между плоскостями геомагнитного меридиана, проходящего через данную точку на поверхности Земли, и геомагнитного меридиана, проходящего через географический полюс. Переход от инерциальной системы координат к геомагнитной

осуществляется в два этапа. На первом шаге преобразуем координаты в гринвичские координаты (1.1), а переход из вращательной геоцентрической СК в геомагнитную СК осуществляется следующим способом:

$$\mathbf{X}_{MAG} = \mathbf{A}\mathbf{X}_{GEO}, \quad (1.5)$$

где  $\mathbf{A}$  – матрица поворота, которая вычисляется следующим образом:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \cos(90-\phi) & 0 & \sin(90-\phi) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(90-\phi) & 0 & \cos(90-\phi) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \lambda & -\sin \lambda & 0 \\ \sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (1.6)$$

Причем  $\phi, \lambda$  – географическая широта и долгота дипольного северного магнитного полюса Земли.

$$\phi = \text{atan} \left( \frac{x_{DP}}{y_{DP}} \right), \quad \lambda = \text{asin} \left( \frac{z_{DP}}{R_{DP}} \right), \quad \text{где} \quad \begin{pmatrix} x_{DP} \\ y_{DP} \\ z_{DP} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g_{10} \\ g_{11} \\ h_{11} \end{pmatrix}_{T_0} + \left( \begin{pmatrix} g_{10} \\ g_{11} \\ h_{11} \end{pmatrix}_{T_1} - \begin{pmatrix} g_{10} \\ g_{11} \\ h_{11} \end{pmatrix}_{T_0} \right) \frac{T - T_0}{T_1 - T_0},$$

При этом  $x_{DP}, y_{DP}, z_{DP}$  – геоцентрические координаты северного полюса Земли,  $g_{10}, g_{11}, h_{11}$  – сферические гармонические коэффициенты модели IGRF-12,  $T_0, T_1$  – эпоха на которую приведены сферические гармонические коэффициенты,  $T$  – момент на которую нужно определить координаты северного полюса Земли (он должен лежать между двумя эпохами  $T_0, T_1$ ). С 2015 до 2020 года к коэффициентам IGRF (2015) добавляются вековые ускорения, следующим способом

$$\begin{pmatrix} x_{DP} \\ y_{DP} \\ z_{DP} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g_{10} \\ g_{11} \\ h_{11} \end{pmatrix}_{T_0} + \begin{pmatrix} a_{10} \\ a_{11} \\ a_{11} \end{pmatrix} (T - T_{2015}),$$

где  $a_{10}, a_{11}, a_{11}$  – ускорения для сферического гармонического коэффициента  $g_{10}, g_{11}, h_{11}$  с эпохи 2015 по 2020,  $T_{2015}$  – эпоха 2015 года [4, 5].

## 2. Численная модель движения космических аппаратов

### 2.1 Уравнения движения

Движение искусственного спутника Земли представляется как движение материальной частицы бесконечно малой массы в поле тяготения центрального тела с массой  $M$  под действием сил, определенных потенциальной функцией  $U$  и совокупности сил  $P$ , не имеющих потенциала. При таких предположениях дифференциальные уравнения движения частицы в инерциальной прямоугольной системе координат, связанной с центральным телом  $M$  можно представить в виде

$$\frac{d^2 \mathbf{x}}{dt^2} = -\frac{\partial U}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{P} \quad (2.1)$$

с начальными условиями

$$\mathbf{x}_0 = \mathbf{x}(t_0), \quad \dot{\mathbf{x}}_0 = \dot{\mathbf{x}}(t_0), \quad (2.2)$$

где

$$U = -\frac{\mu}{r} - R. \quad (2.3)$$

Первое слагаемое в  $U$  – потенциал, обусловленный притяжением сферической Земли, рассматриваемой как материальная точка, а второе слагаемое представляет собой потенциал возмущающих сил,  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3)^T$  – вектор положения спутника,  $t$  – физическое время,  $r$  – модуль вектора положения,  $\mu = k^2 M$ ,  $k^2$  – универсальная гравитационная постоянная. Потенциал  $U = U(t, \mathbf{x})$  является функцией координат и времени,  $\partial/\partial \mathbf{x}$  – градиент. В качестве возмущающих сил, имеющих потенциал, рассматриваются влияния всех несферических составляющих гравитационного поля Земли. Все остальные силы, включая влияние Луны и Солнца, относятся к силам, не имеющим потенциала.

### 2.2 Модели возмущающих сил

Как известно, для решения задач высокоточного определения параметров движения ИСЗ необходимо, чтобы точность орбитальной модели превосходила точность наблюдений в несколько раз, иначе ошибка модели попадет в оценку определяемых параметров. Поэтому современные высокоточные численные модели должны учитывать влияние всех сил, действующих на ИСЗ, включая слабые возмущения от гармоник высоких порядков и возмущения от влияния приливных деформаций, возникающих в результате воздействия Луны и Солнца на твердую Землю, ее океан и атмосферу.

**Алгоритмы вычисления возмущающих сил, связанных с несферичностью Земли.**  
Следуя [6], потенциал  $U$  будем задавать общей формулой

$$U = \frac{\mu}{R_e} \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=1}^n \left( \frac{R_e}{r} \right)^{n+1} \bar{P}_{n,m}(\sin \varphi) \left[ \bar{C}_{n,m} \cos m\lambda + \bar{S}_{n,m} \sin m\lambda \right] \right\}, \quad (2.4)$$

где  $R_e$  – экваториальный радиус Земли;  $\mu$  – гравитационный параметр Земли;  $r$ ,  $\varphi$ ,  $\lambda$  – сферические координаты спутника во вращающейся системе координат, жестко связанной с

Землей;  $\bar{P}_{n,m}(\sin \varphi)$  – полностью нормированные присоединенные функции Лежандра, связанные с классическими  $P_{n,m}$  формулой;

$$\bar{P}_{n,m} = N_{n,m} P_{n,m},$$

где

$$N_{n,m} = \sqrt{\frac{(n-m)(2n+1)(2-E_m)}{(n+m)!}}, \quad E_m = \begin{cases} 1, & m=0 \\ 2, & m \neq 0 \end{cases}$$

$\bar{C}_{n,m}$ ,  $\bar{S}_{n,m}$  – числовые коэффициенты, характеризующие структуру гравитационного поля Земли, причем  $\bar{S}_{n,0} = 0$

Для вычисления составляющих разложения (2.4) и его производных мы использовали рекуррентный алгоритм Л. Каннинггема [7]. Для этого введем шаровую функцию

$$\bar{V}_{n,m} \equiv \frac{\bar{P}_{n,m}(\sin \varphi)(\cos m\lambda + i \sin m\lambda)}{r^{n+1}}, \quad (2.5)$$

и перепишем соотношение (4) как

$$U = \text{Real} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n r_0^n (\bar{C}_{n,m} - i \bar{S}_{n,m}) \bar{V}_{n,m} \quad (2.6)$$

Выразим прямоугольные координаты  $x, y, z$  через сферические  $r, \lambda, \varphi$ :

$$x = r \cos \varphi \cos \lambda, \quad y = r \cos \varphi \sin \lambda, \quad z = r \sin \varphi, \quad (2.7)$$

а функцию  $\bar{V}_{n,m}$  через  $x, y, z$ .

Шаровые функции  $\bar{V}_{n,m}$  и их частные производные по  $x, y, z$  вычисляются с помощью нижеследующих рекуррентных соотношений:

$$\begin{aligned} \bar{V}_{n,m} &= \frac{\bar{P}_{n,m}(\sin \varphi)(x + iy)^m}{\cos^m \varphi}, \\ \bar{V}_{n,m} &= \sqrt{\frac{E_m(2n+1)}{E_{m-1}2m}} \frac{x + iy}{r^2} \bar{V}_{n-1,m-1}, \quad (m = n), \\ \bar{V}_{n,m} &= \sqrt{\frac{4n^2 - 1}{n^2 - m^2}} \frac{z}{r^2} \bar{V}_{n-1,m} - \sqrt{\frac{(2n+1)[(n-1)^2 - m^2]}{(2n-3)(n^2 - m^2)}} \frac{1}{r^2} \bar{V}_{n-2,m}, \\ r^2 &= \sum_{i=1}^3 x_i^2, \quad V_{0,0} = \frac{1}{r}, \\ \frac{\partial \bar{V}_{n,m}}{\partial x} &= -\sqrt{\frac{(2n+1)(n+m+2)(n+m+1)}{2n+3}} \frac{\bar{V}_{n+1,m+1}}{2} \\ &\quad + \sqrt{\frac{2(2n+1)(n-m+2)(n-m+1)}{E_{m-1}(2n+3)}} \frac{\bar{V}_{n+1,m+1}}{2}, \quad (m > 0) \\ \frac{\partial \bar{V}_{n,m}}{\partial x} &= \sqrt{\frac{(2n+1)(n+2)(n+1)}{2(2n+3)}} \text{Real} V_{n+1,1}, \quad (m = 0) \\ \frac{\partial \bar{V}_{n,m}}{\partial y} &= \sqrt{\frac{(2n+1)(n+m+2)(n+m+1)}{2n+3}} i \frac{\bar{V}_{n+1,m+1}}{2} \\ &\quad + \sqrt{\frac{2(2n+1)(n-m+2)(n-m+1)}{E_{m-1}(2n+3)}} i \frac{\bar{V}_{n+1,m+1}}{2}, \quad (m > 0) \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial \bar{V}_{n,m}}{\partial y} = \sqrt{\frac{(2n+1)(n+2)(n+1)}{2(2n+3)}} \text{Imag} V_{n+1,1}, \quad (m=0)$$

$$\frac{\partial \bar{V}_{n,m}}{\partial z} = \sqrt{\frac{(2n+1)(n+m+1)(n-m+1)}{2n+3}} V_{n+1,m}. \quad (m \geq 0)$$

**Возмущения от приливных деформаций центрального тела.** Возмущения от приливных деформаций Земли под действие притяжения Луны и Солнца вводятся как поправки в свободные от приливов коэффициенты  $\bar{C}_{n,m}, \bar{S}_{n,m}$  разложения гравитационного поля Земли (2.4). Основные поправки вычисляются в рамках модели Лява [8]. Это поправки, обусловленные частотно независимыми величинами  $k_{nm}$  и задаются формулой

$$\Delta \bar{C}_{nm} - \Delta \bar{S}_{nm} = \frac{k_{nm}}{2n+1} \sum_{j=2}^3 \frac{GM_j}{GM_+} \left( \frac{R_e}{r_j} \right)^{n+1} \bar{P}_{nm}(\sin \Phi_j) e^{-im\Lambda_j}, \quad (2.9)$$

где  $k_{nm}$  – номинальное число Лява степени  $n$ , порядка  $m$ ,  $R_e, GM_+$  – как и ранее, экваториальный радиус Земли, и гравитационный параметр Земли соответственно,  $GM_j$  – гравитационные параметры Луны ( $j=2$ ) и Солнца ( $j=3$ ),  $r_j$  – расстояние от геоцентра до Луны или Солнца,  $\Phi_j, \Lambda_j$  – соответственно широта и долгота Луны или Солнца в геоцентрической системе координат, фиксированной в теле Земли,  $\bar{P}_{nm}$  – как и ранее, нормализованные присоединенные функции Лежандра.

Влияние на коэффициенты четвертой степени, производимое приливами второй степени вычисляется также по формуле (2.9), но вместо коэффициентов  $k_{nm}$  берутся коэффициенты  $k_{nm}^+$  для неупругой Земли. Значения коэффициентов для моделей упругой и неупругой Земли приведены в [8]. При необходимости более точного учета приливных деформаций учитывается суперпозиция колебаний, связанных с твердым приливом и прецессионно-нутацонными колебаниями. Эта часть приливных возмущений задается моделью Вара. Кроме того, учитываются океанический и атмосферный приливы.

**Лунно-солнечные возмущения.** При наличии в движении ИСЗ возмущений от третьего тела в уравнениях движения появляется сила, определяемая формулой [7]

$$P_i = \mu' \left( \frac{\tilde{x}_i - x_i}{\Delta^3} - \frac{\tilde{x}_i}{r'^3} \right), \quad (2.10)$$

где  $\Delta = \sqrt{(\tilde{x}_1 - x_1)^2 + (\tilde{x}_2 - x_2)^2 + (\tilde{x}_3 - x_3)^2}$  – расстояние от спутника до возмущающего тела;  $\tilde{\mathbf{x}} = (\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3)$  – вектор положения возмущающего тела;  $r' = |\mathbf{x}|$ , а  $\mu'$  – произведение универсальной гравитационной постоянной на массу возмущающего тела. Отношение массы Солнца к массам больших планет задано в IERS соглашении 2010 года [8].

Для определения координат больших планет и Луны, в IERS соглашении 2010 года рекомендуется использовать эфемериды больших планет из фонда DE421/LE421. Ошибка в представлении координат больших планет и Луны в этом фонде имеет порядок одной миллисекунды дуги [2].

**Возмущения от светового давления.** В IERS стандарте 1992 [9] года приводится формула для учета светового давления

$$\mathbf{P} = k \left[ \frac{a_E}{r} \right] C_k s' \frac{\bar{\mathbf{R}}}{r} \Psi, \quad (2.11)$$

где  $k = 4.560 \times 10^{-6}$  Н/м<sup>2</sup> – солнечная постоянная;  $a_E$  – астрономическая единица;  $r$  – гелиоцентрическое расстояние до спутника;  $\bar{\mathbf{R}}$  – гелиоцентрический вектор положения спутника;  $C_k$  – параметр, характеризующее отражательные свойства поверхности спутника;  $s'$  – площадь эффективного миделевого сечения;  $\Psi$  – функция тени, введенная С. Ферраз-Мело в 1963 г и позволяющая избежать скачкообразное изменение функции  $P$  при переходе спутника из освещенного пространства в тень Земли. Вид функции тени зависит от задания формы тени. Самым простым случаем является цилиндрическая форма тени, однако реальная тень имеет коническую форму. В работе [7] приведен алгоритм учета светового давления для конической формы тени. Нужно отметить, что указанный здесь подход является усредненным, он не учитывает особенности строения спутника и специфику отражательных свойств его поверхности.

**Возмущения от сопротивления атмосферы.** Как известно, наибольшую сложность при учете возмущений от сопротивления атмосферы представляет вычисление плотности атмосферы. В последнее время для вычисления плотности атмосферы разработана отечественная модель ГОСТ Р 25645.166-2004 [10]. Как показали оценки, приведенные в [6], модель ГОСТ Р 25645.166-2004 по своим параметрам близка к модели NASA NRLMSISE-00 [11]. Обе модели получены по обширному наблюдательному материалу и рассчитаны на диапазон высот от 0 до 1000 км над поверхностью Земли.

**Релятивистские эффекты.** Релятивистские поправки правых частей уравнений движения, записанных в геоцентрической системе координат, в рамках задачи Шварцшильда могут быть представлены в виде [12]

$$\mathbf{P}_R = 4 \frac{\mu^2}{c^2 r^4} \mathbf{x} + \frac{\mu}{c^2 r^3} [4(\mathbf{x} \cdot \dot{\mathbf{x}})\dot{\mathbf{x}} - (\dot{\mathbf{x}} \cdot \dot{\mathbf{x}})\mathbf{x}],$$

где  $c$  – скорость света.

### 2.3 Анализ возмущающих сил для Метеор-МП

Разрабатываемый программный комплекс предназначен для расчетов положения ИСЗ Метеор-МП. Приведем анализ степени влияния некоторых основных возмущающих сил на движения этих спутников.

Орбитальные характеристики, близкие к характеристикам проектируемого спутника Метеор-МП, приведены в таблице 2.1. Для учета светового давления масса спутника была принята равной 2630 кг, а площадь миделевого сечения – 2 м<sup>2</sup>.

Таблица 2.1 — Кеплеровы элементы орбиты КА Метеор-МП

Название элемента	Значение
Большая полуось, км	7372.686
Эксцентриситет	0.001835
Наклонение, град	99.333
Аргумент перицентра, град	0
Долгота восходящего узла, град	0
Средняя аномалия, град	0
Период обращения, мин.	105
Высота над поверхностью Земли, км	820

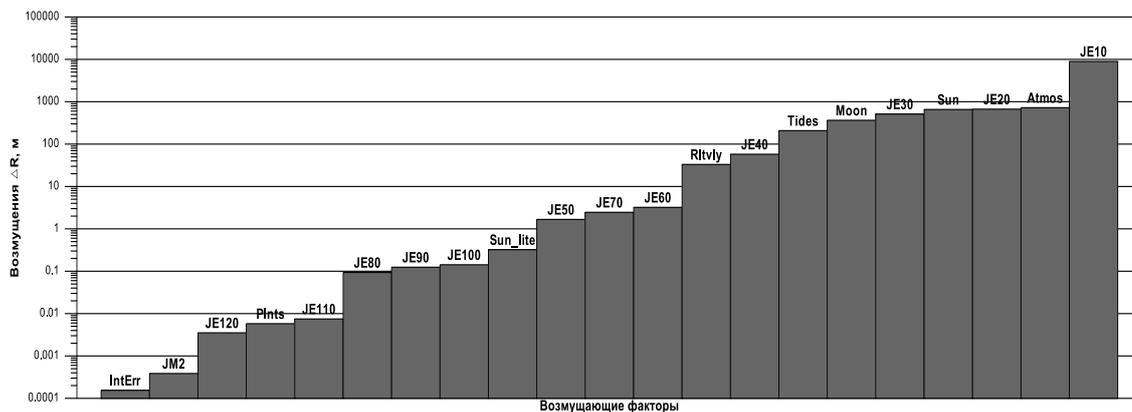


Рисунок 2.1 — Возмущения от силовых факторов для ИСЗ Метеор-МП

Влияние возмущающих факторов на орбитальное движение ИСЗ Метеор-МП представлено на рисунке 2.1. Приведенные результаты получены путем численной оценки модельной ошибки вследствие игнорирования тех или иных возмущающих сил на интервале времени равным 15 суткам или 225 оборотам спутника.

Из рисунка 2.1 видно, что основными возмущающими факторами в движении ИСЗ Метеор-МП являются влияния первых 10 гармоник гравитационного поля Земли (**JE10**). Влияние от гармоник (**JE20-JE120**) убывает с увеличением порядка гармоник. Степень влияние сопротивления атмосферы (**Atmos**) и притяжения Солнца (**Sun**) и Луны (**Moon**), а также приливных сил (**Tides**) приблизительно одного порядка. Наименьший вклад в движения ИСЗ Метеор-МП вносит возмущение от сжатия Луны. Кроме того, на рисунке приведены оценки возмущений, обусловленные ошибками интегрирования (**IntErr**), релятивистскими эффектами (**Rltvly**), световым давлением (**Sun\_lite**) и планет (**Plnts**).

### 3. Трассирование вдоль силовой линии геомагнитного поля

Одной из важных задач программного комплекса Вектор-М это трассирование вдоль силовой линий магнитного поля Земли и вычисление сопутствующей геофизической информации в точке пространства наблюдений для каждого из элементарных векторов, проецируемых на матрицы изображающего детектора в каждом из трех монохроматических каналов.

Задача трассирование вдоль линий магнитного поля Земли в программе Вектор-М подразделяется на следующие подзадачи:

1. Проведение идентификации точек (пикселей) в изображениях эмиссий, полученных с орбиты, в которые проектируется магнитная силовая линия, на которой находится КА в момент экспозиции изображений в каждом канале (при этом высота слоя свечения эмиссии в каждом канале различна). Эта информация позволит решать прямую задачу взаимодействия заряженных частиц с верхней атмосферой и ионосферой, пич-распределения которых измеряются в этот же момент в окрестности КА.
2. Создание матриц сопряжений пикселей изображений конкретных эмиссий, измеряемых на разных высотах, отношение интенсивностей которых позволяет рассчитывать поля распределений средней энергии высыпавшихся электронов (в рамках углов полей зрения  $\sim 30^\circ$  каналов прибора Авровизор-ВИС/МП), а в конечном счете полей поперечных ионосферных проводимостей, интегрированных по высоте.
3. Расчет прогноза пролетов КА над окрестностями точек расположения наземных станций (фотометрических и магнитных) и мощных радиостендов на поверхности Земли и магнитные сопряжения этих точек с точками (пикселями) в получаемых изображениях.
4. Возможность построения матриц множества углов векторов наблюдений с магнитной силовой линией, что позволит решать задачу коррекции дисторсии в каждом наблюдаемом элементарном объеме эмиссии, которая зависит от этого угла.
5. Знание матриц углов элементарных векторов наблюдений с м.с.л. обеспечит условия для проведения анализа разноракурсных последовательных по времени изображений, их реконструкций и получения объемных изображений свечения эмиссий, что в перспективе позволит получать вертикальные распределения потока энергии, средней энергии и ионосферных проводимостей.
6. Обеспечение возможности проведения расчета прогноза ситуаций, когда два или более КА, пролетающих на разных высотах, будут одновременно пересекать окрестность одной и той же магнитной силовой трубки, когда возникают условия для проведения объемных измерений характеристик магнитосферно-ионосферной плазмы.

На основе модели геомагнитного поля IGRF NASA и пакета программ GEOPACK-2008 Цыганенко Н. [13-17] в программном обеспечении Вектор-М реализуется процесс трассирования вдоль силовой линии геомагнитного поля и решаются все перечисленные подзадачи.

#### 3.1 Модель геомагнитного поля IGRF Model

Модель IGRF (International Geomagnetic Reference Field) [5] – это эмпирическое представление магнитного поля Земли. Она представляет главное поле, вызванное только ядром Земли, без внешних источников. Модель использует обычное разложение потенциала магнитного поля по сферическим гармоникам в геоцентрических координатах.

Коэффициенты разложения получены на основе всех доступных источников, включая геомагнитные измерения с обсерваторий, с кораблей, космических аппаратов и спутников.

К программной реализации модели прилагаются файлы с коэффициентами для 1945, 1950, 1955 гг. и т.д. В файлах DGRF####.DAT (#### = year) приводятся коэффициенты, которые определены уверенно и не требуют пересмотра, тогда как в IGRF####.DAT и IGRF####S.DAT коэффициенты нуждаются в обновлении. В IGRF####S.DAT приводятся также первые производные коэффициентов по времени для экстраполяции.

Силовая линия (рисунок 3.1), проходящая через заданную точку пространства, определяется так называемым параметром Мак Илвайна (L-value). Для вычисления его значения в модели IGRF применяется процедура IGRF\_SUB. Ее входные параметры: XLAT – геодезическая широта (в градусах); XLONG – геодезическая долгота (в градусах); YEAR – год (вещественное число); HEIGHT – высота (в км). Выходные параметры: XL – значение параметра Мак Илвайна; ICODE – достоверность результата (1 – параметр определен правильно, 2 – неправильно и 3 – приближенно); DIP и DEC – геомагнитные наклонение и склонение (в градусах), DIMO – магнитный диполь, BABS – вектор магнитного поля, BNORTH, BEAST, BDOWN – координаты вектора магнитного поля в геодезической координатной системе, BEQU – вектор магнитного поля на магнитном экваторе, BBX = BABS / BEQU, а MLONG, MLAT – магнитная долгота и широта.

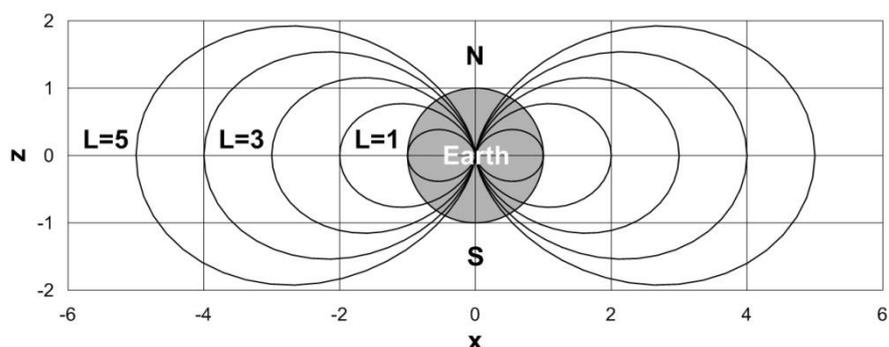


Рисунок 3.1 — Замкнутые силовые линии геомагнитного поля

### 3.2 Модели геомагнитного поля Цыганенко

Эмпирические модели геомагнитного поля Цыганенко Н. [13-17] строятся по большому массиву измерений магнитного поля в магнитосфере и одновременных измерений в солнечном ветре. Они являются результатом аппроксимации данных измерений семейством базисных функций, полученных при численном решении уравнения Лапласа внутри магнитопаузы заданной формы. Данные модели определяют магнитосферное магнитное поле суммой его составляющих, среди которых – магнитное поле токов Чепмена–Ферраро на магнитопаузе, поле кольцевого тока, поле токов магнитосферного хвоста, поле продольных токов. Интенсивности магнитосферных токовых систем и их геометрические размеры являются внутренними параметрами моделей и могут быть определены из наблюдательных данных: параметров солнечного ветра, ММП и геомагнитных индексов. В каждый момент времени параметры определяют мгновенное состояние магнитосферы, а динамика магнитосферы может быть представлена как последовательность таких состояний. Такой подход позволяет эффективно использовать динамические модели магнитосферы для расчетов вектора магнитного поля. Пакет GEOPACK-2008 Цыганенко Н. с кодом программ на языке Фортран можно найти на сайте NASA или на сайте СПбГУ физического факультета [13].

### 3.3 Трассирование вдоль силовой линии магнитного поля. Процедура TRACE

Для реализации процесса трассирования вдоль силовой линии магнитного поля мы использовали процедуру TRACE из пакета подпрограмм GEOPACK-2008. Данная процедура позволяет пользователю проследить поведение силовой линии в произвольной точке пространства в любом направлении (к поверхности Земли или до заданной высоты).

Рассмотрим математическое описание алгоритма трассирования. Магнитное поле  $\mathbf{B}$  в IGRF модели описывается как градиент скалярного потенциала  $-\nabla V$ .

$$V = R_E \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left( \frac{R_E}{r} \right)^{n+1} \left( g_n^m \cos(m\phi) + h_n^m \sin(m\phi) \right) \mathbf{P}_n^m \cos(\theta), \quad (3.1)$$

где  $R_E$  – средний радиус Земли (6371.03 км),  $\phi$  – широта и  $\theta = 90^\circ - \phi$  есть дополнение до широты,  $\mathbf{P}_n^m \cos(\theta)$  это нормированные по Шмидту присоединенные функции Лежандра степени  $n$ , порядка  $m$ ,  $r$  – расстояние от центра Земли до точки наблюдения,  $g_n^m$ ,  $h_n^m$  сферические гармонические коэффициенты, зависящие от времени. Тогда силовая линия магнитного поля может быть представлена следующей формулой:

$$\frac{\partial r}{B_r} = \frac{\partial \theta}{\partial B_\theta} = \frac{r \sin(\theta) \partial \phi}{B_\phi} = \frac{\partial s}{B}, \quad (3.2)$$

где  $\partial s$  – элемент дуги вдоль магнитной силовой линии,  $B = \left( B_r^2 + B_\theta^2 + B_\phi^2 \right)^{1/2}$ ,  $r, \theta, \phi$  – геоцентрические сферические полярные координаты. Таким образом, трассирование вдоль силовой линии магнитного поля выполнялось путем численного интегрирования системы дифференциальных уравнений

$$\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial s} = \frac{\mathbf{B}}{|\mathbf{B}|} = \mathbf{b}, \quad (3.3)$$

при условии, что касательная к каждой точке на силовой линии параллельна магнитному полю той же самой точке. В уравнении (3.3)  $\mathbf{r}$  – вектор положения точки пространства относительно центра Земли,  $s$  – длина дуги вдоль магнитной силовой линии,  $\mathbf{B}$  – вектор магнитного поля,  $\mathbf{b} = \mathbf{B}/|\mathbf{B}|$  – единичный вектор параллельный магнитной силовой линии. Система уравнений (3.3) решалась численно методом Рунге-Кутты-Мерсона (вложенный метод пятого порядка с переменным шагом) [18].

Входными данными процедуры TRACE являются следующие параметры:

- вектор положения  $X_{GSW}, Y_{GSW}, Z_{GSW}$  в «Geocentric Solar Wind» координатной системе (GSW);
- знак направления трассирования (от северной к южной сопряженной точке или наоборот);
- допустимая погрешность шага (ERR=0.0001);
- радиус сферы, определяющий внутреннюю границу области трассирования;
- радиус сферы, определяющий внешнюю границу области трассирования;
- названия процедур отвечающих за внешнее и внутреннее магнитное поле Земли.

Выходные данные процедуры TRACE:

- конечный вектор положения точки пространства  $X_{GSW}, Y_{GSW}, Z_{GSW}$ ;
- массив векторов положения всех точек линии трассы.

### 3.4 Алгоритм расчета матриц сопряжений изображений по магнитной силовой линии

Для расчета матриц Сопряжений изображений по магнитной силовой линии необходимо провести трассирование по магнитному полю по всем пикселям изображения во

всех трех каналах прибора и определить на момент экспозиции изображений сопряженных (по магнитному полю) номеров элементов (пикселей) в изображениях канала 1, канала 2 и канала 3.

Опишем физическую постановку задачи. Строительные оси КА Метеор-МП зафиксированы: ось  $X$  направлена вдоль вектора скорости, ось  $Z$  – с центра Земли на КА Метеор-МП; ось  $Y$  дополняет систему до правой. Изображения при этом строго ориентированы: ось ординат направлена вдоль вектора скорости, ось абсцисс перпендикулярна вектору скорости (условно назовем это СК изображения). Центр изображения совпадает с центром массы КА Метеор-МП. Поправки на отклонения строительных осей КА Метеор-МП вследствие контролируемых изменений его ориентации и измеренные (перед стартом) отклонения осей приборов от строительных осей спутника задаются в градусной мере по осям  $X$  и  $Y$  КА Метеор-МП.

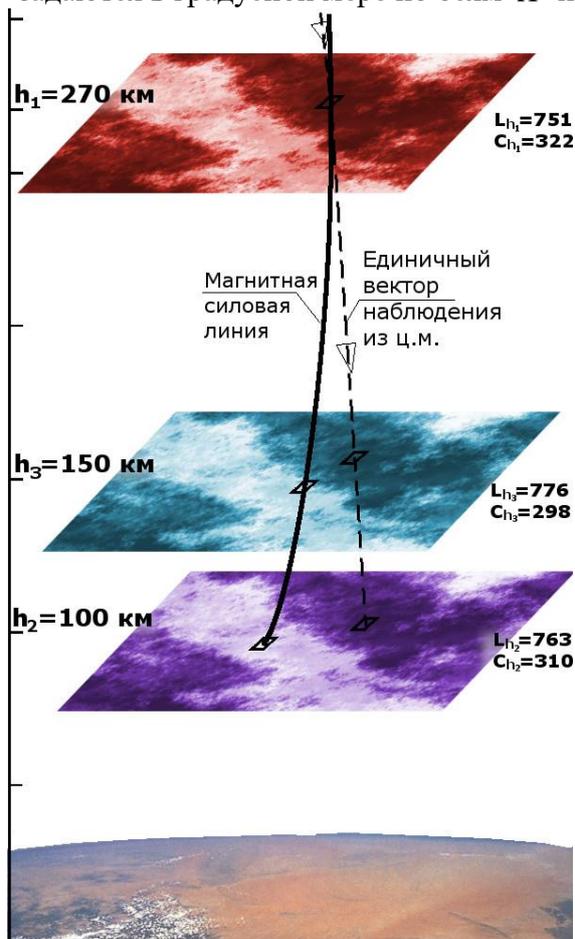


Рисунок 3.3 – Сопряжение элементов изображений Детектора 1 и Детектора 2 (прибора «Авровизор-ВИС/МП» на КА Метеор-МП) по магнитному полю

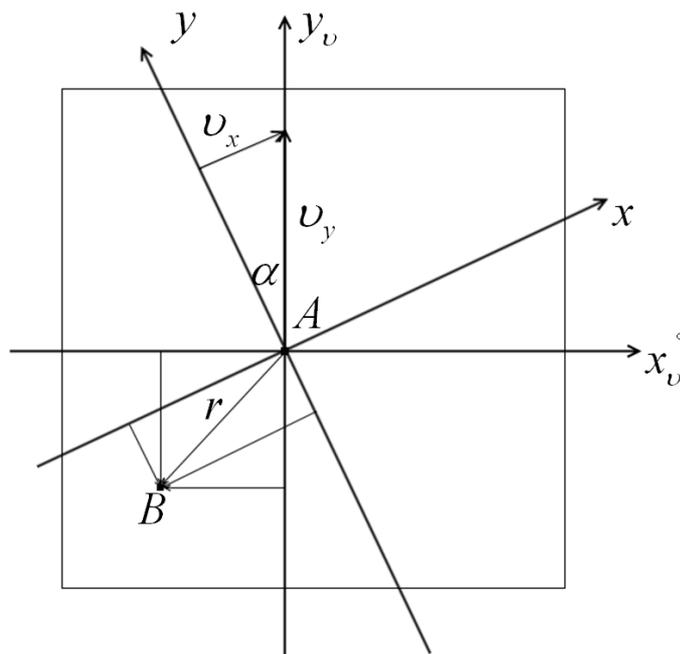


Рисунок 3.4 – Привязка пикселя изображения к геомагнитной системе координат

Методика трассирования силовых линий для построения матриц сопряжения изображений в разных каналах, получаемых с разных высот по геомагнитному полю состоит из:

- изображения, полученные одновременно в двух каналах (с разных высот) связаны с ц.м. КА (и прибором) одними и теми же конкретными векторами наблюдений (в рамках угла поля зрения), т.е. номера пикселей (номер строки и номер столбца) в каждом изображении одинаковые (рисунке 3.3);

- из-за кривизны магнитных силовых линий магнитная силовая линия, проходящая через пиксел изображения (с конкретными номерами строки и столбца) в канале 1 (высота 270 км) будет проходить через пиксел изображения в канале 2 (высота 100 км), который будет иметь другие (отличные от номеров в канале 1) номера строки и столбца;
- задача: определить соответствующие номера для всех пикселов (каналов 1 и 2) и, как результат, построить матрицу сопряжений (по «своим» индивидуальным м.с.л.) всех пикселов изображения в канале 1 с пикселями в канале 2.

#### 4. Вычисление сопутствующей геофизической и астрономической информации для центра масс КА Метеор-МП

Геофизические и астрономические исследования на спутниках обычно требуют многочисленных и разнообразных параметров, характеризующих отрезок траектории спутника, на котором была произведена регистрация показаний приборов. Так же существует и другой ряд необходимой информации, такой как данные географических, геомагнитных, инвариантных, астрономических координат точек вдоль траектории, направления векторов скорости спутника и напряженности магнитного поля Земли, направлении на Солнце, положение и характеристики магнитно-сопряженной точки и т.д. Для получения этой информации необходимо знать лишь начальные данные для КА и моменты времени, для которых нужно провести расчет. Данное программное обеспечение позволяет проводить такие расчеты для центра масс КА Метеор-МП. Вычисления выполняются по запросу пользователя. Рассмотрим подробнее основные блоки вычисляемых параметров [1, 2].

- Координатные преобразования вычисляются по формулам 1 раздела.
- Траекторные расчеты спутника, вычисляются по формулам раздела 2.
- Параметры, связанные с трассированием вычисляются по формулам 3 раздела.
- Расчет инвариантных координат. После вычисления географических координат (1.4) с использованием программы IGRF NASA (раздел 3.1) мы вычисляем инвариантные координаты Мак-Илвайна ( $B, L$ ).
- Расчет географических координат магнитно-сопряженной точки вычисляются с помощью численного интегрирования системы дифференциальных уравнений (3.3) от точки на поверхности Земли до конечной точки силовой линии принадлежащей тоже поверхности Земли.
- Вычисление инвариантной широты  $\Lambda$  выполняется по формуле:

$$\Lambda = \text{Arccos} \left\{ [a \cdot S(a)]^{1/2} \right\},$$

где

$$a = \frac{1}{L} \left( \frac{0.311653}{B} \right)^{1/3}, \quad S(a) = \sum_{n=0}^7 a^n b_n,$$

и где значения коэффициентов  $b_n$  следующие:

$$\begin{aligned} b_0 &= 1.25992100 & b_4 &= -0.00308824 \\ b_1 &= -0.19842590 & b_5 &= 0.00082777 \\ b_2 &= -0.46866320 & b_6 &= 0.00105877 \\ b_3 &= -0.01314096 & b_7 &= 0.00183142 \end{aligned}$$

- Вычисление инвариантного радиуса  $R$  выполняется по формуле:

$$R = L \cos^2 \Lambda = LaS(a).$$

Значение инвариантного радиуса, так же, как и значение параметра  $L$  выдается в радиусах Земли.

- Далее определяется косинус экваториального питч-угла на магнитном экваторе для такой частицы, которая в данной точке испытывает магнитное отражение.

$$X = \left[ 1 - \frac{0.311653}{(L^3 B)} \right]^{1/2}.$$

- Далее вычисляются величины  $B_E(L)$  и  $h_{\min}$ . В Южной Атлантике  $B$  минимально, и высоты линии вертикальных точек тоже минимальна и равна  $h_{\min}$  (в км). Отрицательно значение  $h_{\min}$  означает, что линия зеркальных точек опускается ниже уровня Земли. При  $h_{\min} \leq 100$  км устойчивый захват частиц невозможен. Расчет  $h_{\min}$  имеет смысл лишь для  $L \leq 5$  и  $h_{\min} \leq 100$  км, вне этих пределов, ошибка аппроксимации быстро нарастает.  $B_E(L)$  – поле поверхности Земли, которое соответствует  $h_{\min} = 0$  для данного  $L$ .  $B_E$  находится квадратичной интерполяцией по таблице:

$L$	1.1	1.2	1.25	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	2.0	2.2	2.5	3.0
$B_E$	0.2455	0.2436	0.2423	0.2455	0.254	0.2611	0.2681	0.2755	0.2815	0.294	0.3052	0.321	0.3462

$$\begin{cases} B_E = 0.2455 & \text{для } L \leq 1.1, \\ B_E = (L - 3.0)0.0504 + 0.3462 & \text{для } 3.0 < L \leq 5.0, \\ B_E = B_E(L = 5.0) & \text{для } L > 5. \end{cases}$$

$$h_{\min} \approx 2600 \ln \left( \frac{B_E}{B} \right).$$

- Далее с использование программы IGRF вычисляется склонение магнитного поля  $D$  (град.), положительные значения направлены на восток и наклонение  $J$  (град.).
- Вычисление временных преобразований. По известной формуле вычисляется местное время  $t_{\text{местн.}} = t_{\text{моск.}} - 3^h + \lambda$ , и местное истинное солнечное время:

$$t_{\text{Sun}} = t_{\text{местн.}} + t_{\text{кул.}},$$

$$t_{\text{кул.}} = E + 12^h,$$

$$E = 7^m .7 \sin(L_{\text{Sun}} + 78^\circ) - 9^m .5 \sin 2L_{\text{Sun}}.$$

- Вычисление зенитного расстояния Солнца  $Z_{\text{Sun}}$  и азимут Солнца  $A_{\text{Sun}}$ :

$$\cos Z_{\text{Sun}} = \sin \varphi \sin \delta_{\text{Sun}} + \cos \varphi \cos \delta_{\text{Sun}} \cos t_{\text{Sun}},$$

$$\tan A_{\text{Sun}} = \frac{\cos \delta_{\text{Sun}} \sin t_{\text{Sun}}}{-\cos \varphi \sin \delta_{\text{Sun}} + \sin \varphi \cos \delta_{\text{Sun}} \cos t_{\text{Sun}}},$$

где  $\delta_{\text{Sun}}$  – склонение Солнца.

- Высота тени  $h_{\text{тени}}$  вычисляется с помощью численной модели движения ИСЗ.
- Углы вектора напряженности магнитного поля  $\mathbf{B}$  с осями абсолютной системы координат вычисляются как

$$\cos \alpha_{\text{BX}} = -\sin \varphi \cos \lambda^* \cos J \cos D - \sin \lambda^* \cos J \sin D - \cos \varphi \cos \lambda^* \sin J,$$

$$\cos \alpha_{\text{BY}} = \sin \varphi \sin \lambda^* \cos J \cos D + \cos \lambda^* \cos J \sin D - \cos \varphi \sin \lambda^* \sin J,$$

$$\cos \alpha_{\text{BZ}} = \cos \varphi \cos J \cos D - \sin \varphi \sin \lambda^* \sin J.$$

где  $\lambda^*$  – прямое восхождение Солнца.

- Геомагнитное время (центральный диполь)

$$t_{\text{ГЕОМ}} = \lambda_{\text{МТ}} - \lambda_{\text{MSun}}, \quad (0^h \leq t_{\text{ГЕОМ}} \leq 24^h),$$

$$\sin \lambda_{\text{МТ}} = \cos \varphi \frac{\sin(\lambda - \lambda_0)}{\cos \Phi},$$

$$\cos \lambda_{\text{МТ}} = \frac{\sin \Phi \sin \varphi_0 - \sin \varphi}{\cos \Phi \cos \varphi_0},$$

$$\sin \Phi = \sin \varphi \sin \varphi_0 + \cos \varphi \cos \varphi_0 \cos(\lambda - \lambda_0),$$

где  $\varphi, \lambda$  – географическая широта и долгота точки,  $\varphi_0, \lambda_0$  – географическая широта и долгота геомагнитного полюса со значениями  $(78.5^0, -69^0)$ ,  $\lambda_{\text{MSun}}$  вычисляется по этим же формулам, но географическая долгота Солнца  $\lambda_{\text{MSun}} = \lambda - t_{\text{Sun}}$ , а географическая широта Солнца  $\varphi_{\text{Sun}} = \delta_{\text{Sun}}$ .

- Авроральная долгота  $\lambda_{\text{au}}$  (часы) вычисляется по формуле

$$\lambda_{\text{au}} = \text{Atan}(A/B) - 56^{\circ}.61, \text{ где}$$

$$\begin{aligned} \sin \lambda_{\text{au}} = A = & 0.930414(\cos \varphi \cos \lambda + 0.062724) - \\ & - 0.331082(\cos \varphi \sin \lambda - 0.022319) - \\ & - 0.157062(\sin \varphi - 0.010589), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \cos \lambda_{\text{au}} = B = & -0.353629(\cos \varphi \cos \lambda + 0.062724) - \\ & - 0.923585(\cos \varphi \sin \lambda - 0.022319) - \\ & - 0.147963(\sin \varphi - 0.010589), \end{aligned}$$

- Авроральное местное время вычисляется как  $t_{\text{авр}} = \lambda_{\text{au}} - \lambda_{\text{auSun}}$ ,  $\lambda_{\text{auSun}}$  находится по формуле  $\lambda_{\text{au}} = \text{Atan}(A/B) - 56^{\circ}.61$ , но необходимо учитывать, что географическая долгота Солнца  $\lambda_{\text{Sun}} = (\lambda - t_{\text{Sun}})$ , а географическая широта Солнца  $\varphi_{\text{Sun}} = \delta_{\text{Sun}}$ .
- Угол между вектором  $\mathbf{B}$  и единичным вектором направления на Солнце  $\mathbf{S}_{\text{Sun}}$ :

$$\cos \alpha_{\text{BSun}} = \frac{(\mathbf{B} \mathbf{S}_{\text{Sun}})}{|\mathbf{B}|}, \quad 0^0 \leq \alpha_{\text{BSun}} \leq 180^0.$$

Компоненты единичного вектора  $\mathbf{S}_{\square}$  имеют следующие значения в магнитной системе координат:

$$\mathbf{S}_{\text{Sunx}} = -\sin Z_{\text{Sun}} \cos A_{\text{Sun}},$$

$$\mathbf{S}_{\text{Sunny}} = -\sin Z_{\text{Sun}} \sin A_{\text{Sun}},$$

$$\mathbf{S}_{\text{Sunz}} = -\cos Z_{\text{Sun}},$$

- Компоненты вектора скорости в горизонтальной (геомагнитной системе координат)

$$V_x^{(1)} = -V_x \sin \varphi \cos \lambda - V_y \sin \varphi \sin \lambda + V_z \cos \varphi,$$

$$V_y^{(1)} = -V_x \sin \lambda + V_y \cos \lambda,$$

$$V_z^{(1)} = -V_x \cos \varphi \cos \lambda - V_y \cos \varphi \sin \lambda - V_z \sin \varphi.$$

- Склонение  $D_V$  и  $J_V$  наклонение для вектора скорости в геомагнитной системе координат определяются по формулам:

$$\cos D_V = \frac{V_x^{(1)}}{\sqrt{V_x^{(1)2} + V_y^{(1)2}}}, \quad \tan J_V = \frac{V_z^{(1)}}{\sqrt{V_x^{(1)2} + V_y^{(1)2}}}.$$

- Вычисления для магнитно-сопряженной точки вычисляются по тем же формулам, что описаны выше.

В программе Вектор-М введены следующие обозначения:

ALT	высота ( км )
LAT	географическая широта ( -90 – +90 )
LONG	географическая долгота ( 0 – 360 )
L	параметр Мак-Илвайна
L0	инвариантная широта сопряженной точки на Земной поверхности (для INVRAD=1)
MLT	магнитное местное время (час.десятичная часть от часа)
T SUN	истинное солнечное время (час.десятичная часть от часа)
Z SUN	солнечный зенитный угол (град.)
A SUN	азимут Солнца (град.)
BX MAG	северная составляющая вектора напряженности магнитного поля (mGs)
BY MAG	восточная составляющая вектора напряженности магнитного поля ( mGs)
BZ MAG	вертикальная составляющая вектора напряженности магнитного поля (mGs)
D MAG	склонение магнитного поля (град.), положительные значения направлены на восток
I MAG	наклонение (град.), положительные значения направлены на северное полушарие
B MAG	модуль вектора напряженности (mGs)
BE	минимальное значение магнитного поля модуль для L – оболочка земной поверхности (mGs)
BX ANGL, BY ANGL, BZ ANGL	углы вектора напряженности магнитного поля с осями X,Y,Z абсолютной системы координат (град.). (ось OX АСК направлена в точку весеннего равноденствия, ось OZ – совпадает с осью вращения Земли)
LD	Широта магнитного диполя ( град.), -90 – 90
AUR LONG	авроральная долгота (град.)
T AUR	авроральное местное время (час. десятичная часть от часа)
H MIN	минимальная высота для линии зеркальных точек энергичных захваченных частиц (минимальная зеркальная точка высоты вдоль L–оболочки) (км)
T LOC	местное солнечное время (час. десятичная часть от часа)
H SHADE	высота тени Земли ( 0 = Земля освещена Солнцем), км
HS	ALT- высота тени Земли выше высоты спутников, км (<= 0 = спутник освещен Солнцем)
COSPEQ	косинус питч-угла на магнитном экваторе для такой частицы которая в данной точке испытывает магнитное отражение
X VELM Y VELM Z VELM	компоненты скорости спутника в локальной геомагнитной СК
D VELM	склонение вектора спутника в локальной геомагнитной СК (град.)

I VELM	наклонение вектора спутника в локальной геомагнитной СК (град.)
INVRAD	инвариантный радиус (RE).
INVLAT	инвариантная широта точки (град.).
BSANGL	угол между вектором магнитного поля и вектором направленности на Солнце
ASLONG	долгота в абсолютной СК.
VX ANGL VY ANGL VZ ANGL	углы между вектором скорости спутника и осями абсолютной СК (град.).
CO ALT	высота сопряженной точки в противоположной полусфере (км).
CO LAT	географическая долгота сопряженной точки (-90 – 90)
CO LONG	географическая широта сопряженной точки (0 – 360 )
CO TSUN	истинное солнечное время для сопряженной точки (час. десятичная часть от часа)
CO ZSUN	солнечный зенитный угол для сопряженной точки (град.)
CO ASUN	азимут Солнца для сопряженной точки (град.)
CO LOCT	солнечное местное время для сопряженной точки
X ABS Y ABS Z ABS	координаты в абсолютной СК (м)
X Y Z	координаты во вращающейся СК (м)
VX ABS VY ABS VZ ABS	скорости в абсолютной СК (м.с)
VX VY VZ	скорости во вращающейся СК (м/с)

**Расчет сопутствующей информации на заданной высоте с учетом данных расчета ориентации для каждого элемента изображения.**

Используя формулы, описанные выше в данном разделе и алгоритм сопряжения трех изображений в разделе 3.4, мы можем определить сопутствующую информацию на заданной высоте с учетом данных расчета ориентации для каждого элемента изображения.

Алгоритм перехода можно описать так:

- пользователь выбирает точку на любом изображении;
- зная координаты этой точки в СК изображения, мы переходим, используя алгоритм изложенный в разделе 3.4, к географическим координатам;
- используя формулу (1.4) и формулы из данного раздела, получаем нужную нам информацию;
- отображаем эту информацию пользователю.

## 5. Алгоритм вычисления границ аврорального овала

Авроральный овал является своеобразной динамической системой координат, связанной с характером протекания высокоширотных геофизических процессов. Овалы расположены асимметрично вокруг геомагнитных полюсов (рис. 5.1). Положение и ширина авроральной области изменяется в зависимости от геомагнитной активности (рис. 5.1). В научном мире представляет значительный интерес корректное математическое описание положения границ овала и диффузного свечения в зависимости от доступных индексов магнитной активности. Это позволяет по величине магнитной возмущенности определить положение границ для любого момента местного времени.

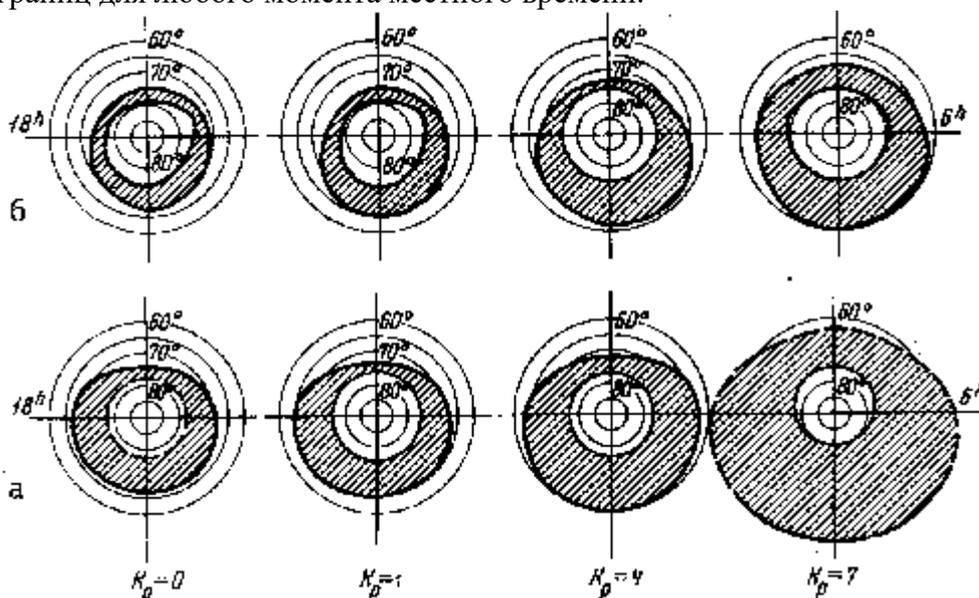


Рисунок 5.1 – Авроральные овалы в северном ( а ) и южном ( б ) полушариях в зависимости от магнитной активности.

Первая простая аппроксимация экваториальной границы овала в зависимости от местного времени и уровня магнитной активности, задается  $Q$ -индексом. Изменения положения экваториальной границы для  $Q > 0$  с точностью  $\sim 1^\circ$  широты описывается формулой [19]

$$\mathcal{G}_e = 18 + 0.9Q + 5.1 \cos(t - 12^h),$$

где  $\mathcal{G}_e$  – полярное расстояние в градусах широты,  $t$  – часовой угол, отсчитываемый от полуночи к востоку.

Экваториальная граница диффузного свечения задается в следующем виде [19]

$$\mathcal{G}_e = A_0 + A_1 \cos(15(t + \alpha_1)) + A_2 \cos(15(2t + \alpha_2)) + A_3 \cos(15(3t + \alpha_3)) \quad (5.1)$$

где  $\mathcal{G}$  – широта границы в исправленных геомагнитных координатах;  $A_i$  – амплитуды, выраженные в градусах широты;  $t$  – время в часах местного геомагнитного времени;  $\alpha_i$  – фазы в том же часовом измерении.

На первом этапе по данным о границах овала, определялись коэффициенты  $A_i$  и  $\alpha_i$  для разных значений  $Q$ -индексов. Значения  $Q$  пересчитывались в  $AL$  по формулам регрессии и строились зависимости  $A_i = \varphi(\lg(AL))$  и  $\alpha_i = \phi(\lg(AL))$ . Эти кривые, в свою очередь,

аппроксимировались полиномами третьей степени вида [19]

$$A_i(\alpha_i) = a_0 + a_1 \lg(AL) + a_2 \lg^2(AL) + a_3 \lg^3(AL) \quad (5.2)$$

Для диффузного свечения для всех часов местного времени приведены зависимости  $\Phi' = b_0 + b_1 K_p$ . Так как соседние значения  $b_0$  и  $b_1$ , значительно изменялись, и точность их определения была различна, то они предварительно сглаживались по формуле трапеции с весовыми множителями, равными коэффициентам корреляции для данного часа. Значения  $K_p$  в свою очередь переводились в величины  $AL$ -индекса по соответствующим формулам регрессии. Все вычисления  $A_i$  и  $\alpha_i$  проводились методом наименьших квадратов.

Характер зависимости  $a_i$  от  $\lg(AL)$  был различен, но в большинстве случаев полином третьей степени достаточно хорошо описывал их поведение. Наибольший разброс наблюдается для фаз, поэтому перед аппроксимацией они предварительно сглаживались по формуле трапеции.

Коэффициенты  $a_i$  для всех  $A_i$  и  $\alpha_i$  даны в таблице 5.1 [19, 20]. Для определения границ необходимо определить коэффициенты  $A_i$  и  $\alpha_i$  для данного уровня магнитной активности по формуле (5.2) и, подставив эти значения в формулу (5.1), вычислить положение соответствующей границы в выбранном интервале времени для данного значения  $AL$ .

Используя формулу (5.1), можно рассчитать размеры овала и диффузного свечения. Размеры овала и экваториального диффузного свечения увеличиваются с ростом  $\lg(AL)$ , причем для овала наблюдается почти линейная зависимость. При средней и высокой магнитной активности площади овала и диффузного свечения равны между собой. Так как, средняя интенсивность свечения внутри овала на порядок выше, чем в диффужном свечении, то соответственно и общий энергетический вклад авроральных электронов в овал должен быть тоже на порядок выше.

Таблица 5.1: Коэффициенты аппроксимаций амплитуды и фазы для формул, описывающих границы аврорального свечения

	$A_0$	$A_1$	$\alpha_1$	$A_2$	$\alpha_2$	$A_3$	$\alpha_3$
Полусная граница овала							
$a_0$	-0.07	-10.06	-6.61	-4.44	6.37	-3.77	-4.48
$a_1$	24.54	19.83	10.17	7.47	-1.10	7.90	10.16
$a_2$	-12.53	-9.33	-5.80	-3.01	0.34	-4.73	-5.87
$a_3$	2.15	1.24	1.19	0.25	-0.38	0.91	0.98
Экваториальная граница овала							
$a_0$	1.61	-9.58	-2.22	-12.07	-23.98	-6.56	-20.07
$a_1$	23.21	17.78	1.50	17.49	42.79	11.44	36.67
$a_2$	-10.97	-7.20	-0.58	-7.96	-26.96	-6.73	-24.20
$a_3$	2.03	0.96	0.08	1.15	5.56	1.31	5.11
Экваториальная граница диффузного свечения							
$a_0$	3.44	-2.41	-1.68	-0.74	8.69	-2.12	8.61
$a_1$	29.77	7.89	-2.48	3.94	-20.73	3.24	-5.34
$a_2$	-16.38	-4.32	1.58	-3.09	13.03	-1.67	-1.36
$a_3$	3.35	0.87	-0.28	0.72	-2.14	0.37	0.76

## 6. Расчет прогноза Ситуаций

Кроме КА «Метеор-МП» в околоземном пространстве могут находиться другие подобные спутники. И для глубокого понимания природы авроральных овалов и процессов с ними связанных нужно совместное планирование экспериментов. Следующие ситуации могут представлять научный интерес:

- Моменты пересечения несколькими КА одной силовой линии.
- Моменты пересечения несколькими КА заданных точек на поверхности Земли.
- Моменты пересечения несколькими КА заданной высоты или географических координат.
- Моменты пересечения несколькими КА зон северного или южного авроральных овалов.

### 6.1 Вычисление моментов одновременного пересечения окрестности одной и той же магнитной силовой линии

Трассируя геомагнитную линию и вверх, вниз, и в противоположную полусферу, мы сможем определить момент пересечения несколькими КА момент пересечения этих линий. Алгоритм можно описать следующим образом

- Определяем КА для которых нужно найти моменты пересечения геомагнитной линии.
- Трассируем геомагнитную линию с шагом времени заданным пользователем вверх (до самого высокого спутника) и вниз (до самого низкого спутника). Такую же процедуру проделываем для противоположной полусферы.
- По формулам (1.5) переходим от географических координат к геомагнитным.
- Определяем местоположения выбранных спутников и сравниваем с полученными географическими координатами. Если значения попадают в нужный диапазон, то считаем, что данные КА пересекли одну геомагнитную линию.

### 6.2 Расчет ситуаций пролета КА над окрестностью заданных точек на Земле

Расчет ситуаций пролета КА над окрестностью заданных точек на Земле, включая наземные источники радиоизлучения и точки расположения наземных диагностических приборов проводится в 2х вариантах по запросу:

- а) Вычисление интервалов времени (мск) при пересечениях проекцией поля зрения прибора с географической окрестностью (заданного радиуса) конкретной географической точки на высоте свечения, соответствующей 100 км /150 км /270 км. Картографирование пересекающихся зон на карте на этом интервале времени.
- б) Вычисление момента времени (мск) при пересечении проекцией поля зрения прибора с окрестностью (заданного радиуса) магнитной силовой линии, восстановленной из заданной географической точки на Земле до высоты 100 км / 150 км / 270 км.

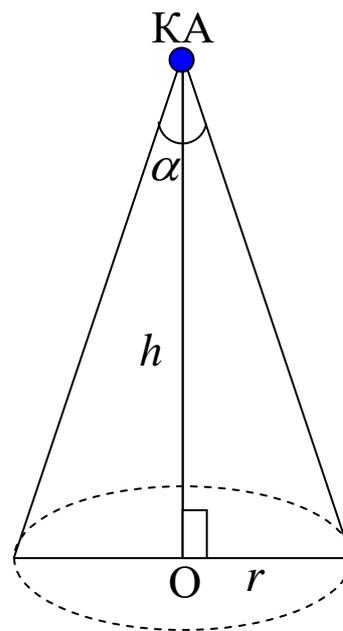


Рисунок 6.1 - Схема вычисления поля зрения прибора

Алгоритм действий для пунктов а) и б) следующий.

Для пункта а):

Зная угол обзора прибора  $\alpha$  на КА и координаты КА в заданный момент времени, мы можем определить высоту  $h$  КА над поверхностью Земли и окрестность географической точки радиуса  $r$ , покрывающую полем зрения прибора, по следующей формуле  $r = h \tan(\alpha/2)$  (рисунок. 6.1). Таким образом, сравнивая координаты географической окрестности, заданного радиуса, конкретной географической точки на высоте свечения и координаты вектора  $r$ , мы можем определить имеются ли пересечения и в какое время.

Для пункта б):

Проводим трассирование из заданной географической точки на Земле до нужной высоты (100 км / 150 км / 270 км), определяем геомагнитную линию, затем вычисляем КА для которых нужно найти моменты пересечения с вычисленной геомагнитной линией. Определяем местоположения выбранных спутников и сравниваем с полученными географическими координатами силовой линии на заданной высоте. Если значения попадают в нужный диапазон, то легко определить моменты времени пролета КА через полученную область.

## 7. Расчет матриц сопряжений изображений авроральных эмиссий по магнитной силовой линии полученных с наземных станций

Динамические высыпания заряженных частиц в авроральном овале и полярной шапке во время суббурь и их электродинамические следствия порождают неоднородности в ионосферной плазме Земли. И как известно радиосигналы при «протыкании» возмущенной ионосферы на пути от передатчика на навигационном спутнике до приемника на Земле, испытывают сцинтилляции, что может привести к искажению или потере сигнала. Таким образом, для решения данной проблемы нам необходимо знать распределения интенсивности свечения конкретных авроральных эмиссий с разной степенью точности, т.к. они отражают энергетические характеристики высыпающих частиц. Изображения этих распределений могут получаться как с поверхности Земли, так и с орбиты.

Т.к. космический эксперимент только планируется и у нас еще нет реальных космических снимков с орбит КА, мы решили провести тестирование ПО Вектор-М (блок по расчету матриц сопряжений изображений авроральных эмиссий по м.с.л.), используя изображения авроральных эмиссий [21], полученных со станции Амундсена-Скотта (антарктическая станция), расположенной на Южном Полюсе с координатами  $(-90^\circ, 0^\circ)$ . Наблюдения на станции получены в двух эмиссиях:  $\lambda 630,0$  нм ( $h \approx 200$  км) и  $\lambda 557,7$  нм ( $h \approx 115-120$  км). Таким образом, мы попытались оценить влияние сопряжения элементов изображений авроральных эмиссий, излучаемых на разных высотах, на точность определения отношений интенсивности конкретных эмиссий. Высыпания авроральных электронов и протонов происходят вдоль магнитных силовых линий (м.с.л.), которые в авроральной зоне отклонены от вертикали к Земле на угол более десяти градусов. Поэтому анализ распределений интенсивности в геометрически соосных изображениях разновысотных эмиссий, физически правильно проводить с учетом сопряжения элементов изображений по м.с.л.

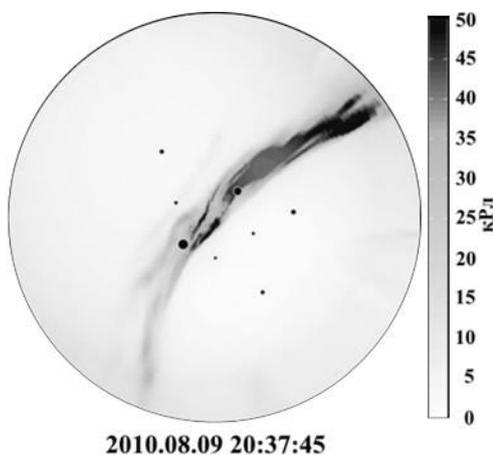


Рисунок 7.1 – Пример All-sky изображений  $I(557,7)$  нм на высоте 120 км, полученные со станции Амундсена-Скотта [21].

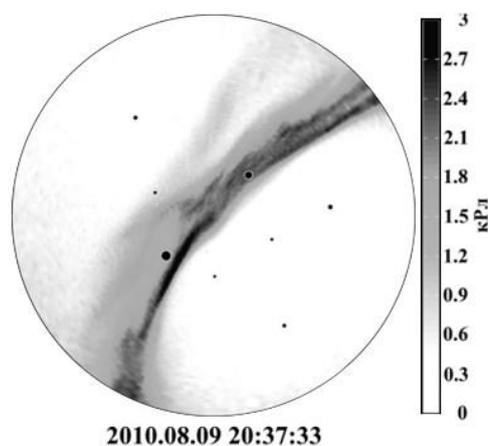


Рисунок 7.2 – То же что и на рисунке 7.1, но для  $I(630,0)$  нм на высоте 200 км.

На первом этапе работы было проведено масштабирование и совмещение, опубликованных в условных цветах в работе [21], четырех пар All-sky изображений (изображения, охватывающие всю полусферу) авроральных эмиссий  $\lambda 557,7$  и  $\lambda 630,0$  нм (рисунки 7.1-7.2), полученных в августе 2010 г. на станции Амундсена-Скотта на высотах 120 и 200 км соответственно. Черные точки маркируют места протыкания авроральных структур сигналами GPS, в которых наблюдались фазовые сцинтилляции (диаметр точек

зависит от величины индекса сцинтилляций) в конкретные моменты времени близкие к моментам экспозиций.

Справа от изображений 7.1-7.2 приведены шкалы абсолютной интенсивности эмиссий в кРэлях. Алгоритм идентификации элементов в All-sky изображениях был описан в [21] и в данной работе не приводится.

### Отношение интенсивностей для каждого элемента изображений эмиссий

Размер каждого изображения представленного на рисунках 3–4 составляет 586 на 586 пикселей, они ориентированы таким образом, что положительное направление оси ординат указывает на Гринвичский меридиан. Используя вышеперечисленные свойства и полагая, что центр изображений совпадает с координатами станции Амундсена-Скотта с координатами  $(-90^\circ, 0^\circ)$ , можно вычислить отношения интенсивностей двух эмиссий. Предварительно изображения должны быть повернуты на угол запаздывания, который возникает из-за вращения Земли вследствие отличия моментов экспозиции изображений на известный интервал времени. Если использовать метод геометрического наложения двух изображений, то нужно выполнить следующие действия:

1. определить координаты каждого элемента относительно известного центра изображения (координаты станция Амундсена-Скотта) небесной сферы;
2. зная количество пикселей в изображении и физический размер фотографии небесной сферы в км, мы можем вычислить координаты каждого элемента относительно геоцентра;
3. далее, для обратного перехода от геоцентрических координат к пикселям, необходимо найти разность между координатами станции и полученными геоцентрическими координатами элементов изображения;
4. повторить в обратном порядке действия 2, 1.

Однако из-за отклонения от нормали и кривизны магнитных силовых линий (м.с.л.) вычисление отношения интенсивностей разновысотных эмиссий нужно проводить для сопряженных по магнитному полю элементов изображений. Поэтому осуществляются дополнительные действия между шагами 2 и 3:

5. переход к геомагнитной системе координат;
6. трассирование вдоль геомагнитной силовой линии от каждого элемента изображения  $\lambda 630,0$  нм до элемента изображения  $\lambda 557,7$  нм.

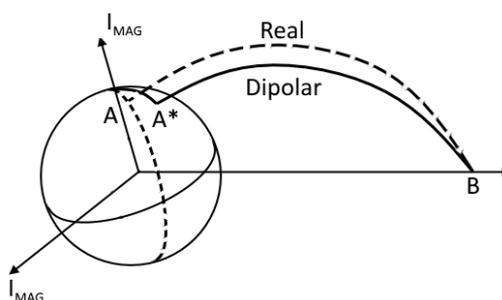


Рисунок 7.3 – Определение CGM (Corrected Geomagnetic Coordinates) координат

Процедура трассирования вдоль геомагнитной силовой линии, построенная на основе модели геомагнитного поля IGRF NASA и пакета программ GEOPACK-2008 Н.А. Цыганенко [13-17] (раздел 3), состоит из следующих шагов: начальные координаты трассируются вдоль магнитной силовой линии с заданной высоты до магнитной экваториальной плоскости с учётом всех недипольных гармоник в главном поле, затем проводится обратное трассирование на нужную высоту, но уже с использованием только дипольной модели

внешнего поля. Точка, в которую возвращается процедура трассирования  $A^*$  и будет CGC для точки A, из которой мы стартовали (рисунок 7.3).

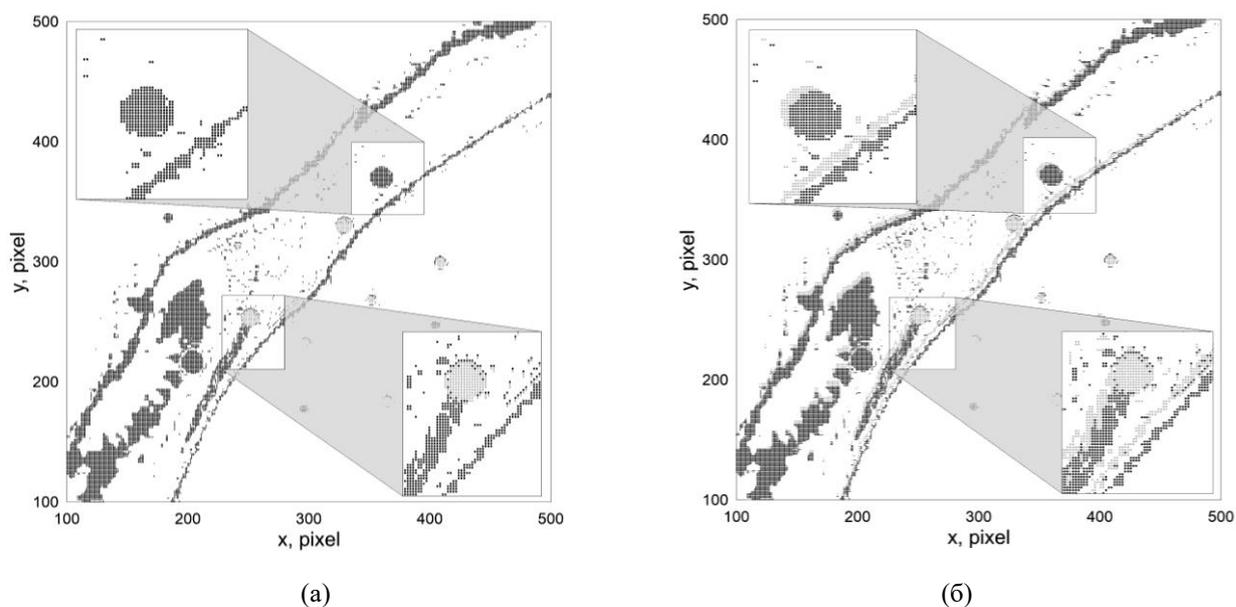


Рисунок 7.4 – Смещение изображений разновысотных эмиссий сопряженных: (а) по геометрическому наложению (вдоль векторов наблюдений каждого элемента) двух изображений и (б) по магнитному полю элементов изображений. Прямоугольниками выделены увеличенные области изображения, где смещения интенсивностей наиболее видны.

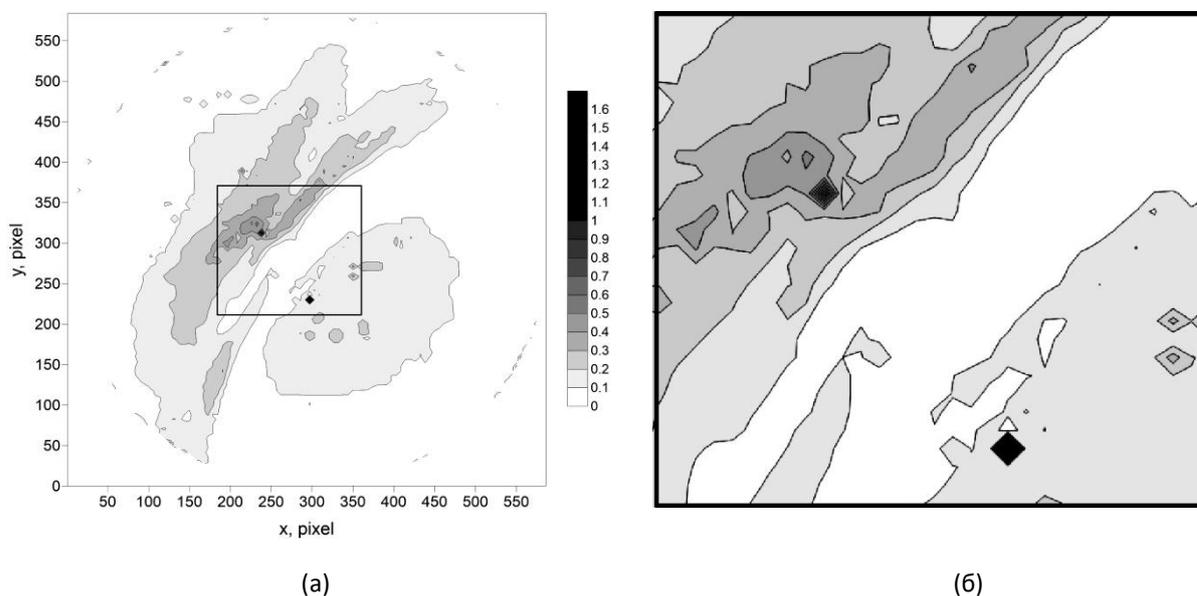


Рисунок 7.5 – Карта отношения разновысотных интенсивностей  $I(630,0)/I(557,7)$ . (а) сопряженных вдоль векторов наблюдений каждого элемента (для рисунка 7.1), (б) увеличенный фрагмент черного прямоугольника на (а).

На рисунке 7.4 можно видеть смещения пикселей изображений эмиссий, полученных на высотах 120 (серый цвет) и 200 км (черный цвет), соответственно, сопряженных (а) по геометрическому наложению двух изображений и (б) по магнитному полю элементов изображений. Прямоугольниками выделены области, где смещения интенсивностей более

заметны. Из рисунка 7.4 (а) видно, что геометрический метод сопряжения двух разновысотных изображений не дает полной картины изменения геомагнитного поля в зависимости от высоты. Однако применение метода трассирования вдоль силовой линии между двумя высотами (б) позволяют увидеть смещения сцинтилляций на несколько элементов изображений, что соответствует расстояниям ~30 км.

На рисунке 7.5 показана карта отношения интенсивностей разновысотных эмиссий сопряженных вдоль векторов наблюдений каждого элемента изображений. Справа от рисунка 7 (а) располагается черно-белая шкала отношения интенсивностей  $I(557,7)$  и  $I(630,0)$  нм, значения которых не превышают 1,6.

### **Анализ численных результатов**

В процессе обработки изображений (рисунок 7.1-7.2) были получены следующие результаты:

1) Построены изображения эмиссий, полученных на высотах 120 и 200 км (рисунок 7.4), сопряженных по геометрическому наложению двух изображений и по магнитному силовому полю. После наложения изображений друг на друга видно, что после процедуры трассирования происходит смещение элементов по осям (рисунок 7.5 (б)). Смещение по оси  $X$  составляет ~4 пикселя, а по оси  $Y$  – ~6 пикселей, что соответствует ~22.2 км и ~33.3 км, соответственно. Такие расстояния могут быть соизмеримы, а могут и значительно превосходить минимальный поперечный размер авроральных структур и «темных» промежутков между ними.

2) Построены карты отношений интенсивностей разновысотных эмиссий  $I(630,0)/I(557,7)$  нм (рисунок 7.5) сопряженных вдоль векторов наблюдений каждого элемента изображений. Как видно из цветовой шкалы справа (рисунок 5 (а)), большая часть значений отношений интенсивностей имеет светло серый цвет и таким образом не превышают значение 0,5. 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) Согласно, как следствие смещения, изменятся пространственные распределения средней энергии электронов (функционально связанных с отношением интенсивности эмиссий, нормированном на единичный поток энергии электронов  $F_e$ ), как минимум на несколько десятков эВ, по сравнению с распределением  $E_{cp}^e$ , рассчитанным по отношению интенсивностей эмиссий взятых при их геометрическом наложении. О более точной величине изменения  $E_{cp}^e$  мы могли бы судить при наличии экспериментальных данных об  $F_e$ . Измерения распределений  $I(427,8)$  нм, на основе которых можно будет определять  $F_e$ , предполагаются в эксперименте с имаджером Авровизор-ВИС/МП, кроме того, на борту КА Метеор-МП будет непосредственно измеряться форма энергетического распределения электронов. Тем не менее, из рассмотренных примеров наземных изображений, полученных над Южным полюсом, ясно, что отличие средней энергии высыпавшихся электронов, определенной дистанционным методом с орбиты с учетом трассирования вдоль м.с.л., может существенно повлиять на знания условий распространения сигнала в конкретной локальной области полярной ионосферы, а в конечном счете на выяснение зависимости изменений индекса фазовых сцинтилляций при пересечении им авроральных структур разных масштабов.

Данные результаты опубликованы в статье [22-23].

## 8. Модель наблюдения авроральными имаджерами эмиссий в одной и той же авроральной структуре с разных ракурсов с разных орбит и с поверхности Земли

В данном разделе мы описываем космический эксперимент, связанный с одновременными наблюдениями одних и тех же областей полярной ионосферы имаджерами с орбит космических аппаратов (КА). Представляем методику вычисления пересечения полей зрения авроральных имаджеров с учетом множества условий налагаемых на работу приборов во время пребывания их на орбитах КА. Приведены численные результаты на примере КА Метеор-МП и Зонд.

### 8.1 Описание космического эксперимента

Нам необходимо сделать прогноз ситуаций пересечения полей наблюдения каналов авроральных имаджеров с разных орбит двух КА для одновременных наблюдений пространственного распределения эмиссий  $\lambda 630$  нм [OI] и  $\lambda 427,8$  нм  $N_2^+$  в одних и тех же авроральных структурах под разными углами. Информация о сопряжении измерений характеристик плазмы и изображений авроральных эмиссий позволит проводить тестовое сравнение интенсивностей конкретных эмиссий в подножных точках (*f.p.*) м.с.л. в изображениях эмиссий с модельными интенсивностями, рассчитанными по данным энергетических спектров и пич-распределений высыпающих заряженных частиц. Результаты сравнительного анализа пространственного распределения интенсивности разновысотных эмиссий по всему полю наблюдений, включая *f.p.* м.с.л., и их отношений позволят определять тип наблюдаемой авроры, источник энергичных частиц, и их энергетические характеристики  $E_{cp}=f(I_{630}/I_{427,8})$  и  $Fe=f(I_{427,8})$  и, как следствие, локальную концентрацию электронов в максимуме E-области ионосферы. При этом отношения интенсивностей указанных эмиссий будут вычисляться не по геометрии луча наблюдения до высот эмиссий, а по интенсивностям в пикселях, сопряженных одной и той же м.с.л., что, как было показано в [24], существенно влияет на точность расчетов  $E_{cp}$ . Распределения интенсивностей эмиссий в одних и тех же фрагментах авроральных структур на локальных участках аврорального овала, полученных с двух и более ракурсов одновременно, позволят отработать технологию 3D-реконструкций изображений эмиссий и вычисляемой локальной электронной концентрации в E-области в пересекаемых секторах MLT аврорального овала [25]. Таким образом, основная мотивация экспериментов с авроральными имаджерами Авровизор-ВИС/МП и Летиция – исследования и дистанционный мониторинг эволюции вертикального объемного распределения средней энергии высыпающих заряженных частиц и электронной концентрации.

Характеристики авроральных имаджеров Летиция и Авровизор-ВИС/МП представлены в [26, 27], где они сравниваются с работавшими на орбитах в 2005-2015 зарубежными аналогами: мультиспектральным авроральным имаджером МАС на японском малом КА

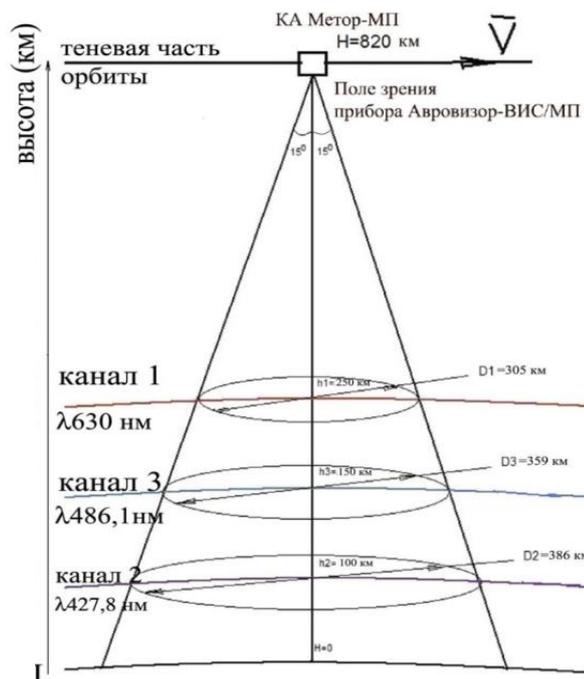


Рисунок 8.1 – Поле зрения прибора Авровизор-ВИС/МП

REIMEI (INDEX) [28] и FAI на канадском малом КА e-POP [29]. Поля зрения орбитальных имаджеров составляет  $\sim 30^\circ$ . Три параллельных камеры (настроенные на разные эмиссии) (рисунок 8.1) Авровизор-ВИС/МП направлены вдоль вектора нормали от центра масс спутника до центра Земли. Две камеры Летиции направлены под углом 30 град от строительной оси КА ( $-Z$ ) в направлении в сторону Земли с учетом того, что его ось  $+Y$  всегда направлена на Солнце. Съемка проводится на высоте 100 км от поверхности Земли.

## 8.2 Орбиты КА Метеор-МП и Зонд. Модель движения КА.

Орбитальные элементы, близкие к характеристикам проектируемых спутников Метеор-МП (таблица 2.1) и Зонд, приведены в таблице 8.1.

В таблице 8.1 –  $t_0$  начальный момент времени, а  $a, e, i, \omega, \Omega, M_0, T, h$  это большая полуось, эксцентриситет, наклонение, аргумент перигея, долгота восходящего узла, средняя аномалия, период обращения и высота над поверхностью Земли соответственно. Как видно из таблицы 8.1, орбиты спутников Метеор-МП и Зонд почти круговые, высота над поверхностью Земли составляет меньше 1000 км, период обращения порядка  $\sim 1.5$  часа, наклонение больше 90 град.

В качестве модели движения КА использовалась численная модель движения ИСЗ (раздел 2).

Таблица 8.1 — Кеплеровы элементы орбит КА

Элементы орбиты	Метеор	Зонд
$t_0$	18.09.2025, 00:00:00	18.09.2025, 00:00:00
$a$ , км	7372.686	7030.0
$e$	0.001835	0.000001
$i$ , °	99.333	98.0
$\Omega$ , °	0	0
$\omega$ , °	0	0
$M_0$ , °	0	0
$T$ , мин	105	100
$h$ , км	820	650

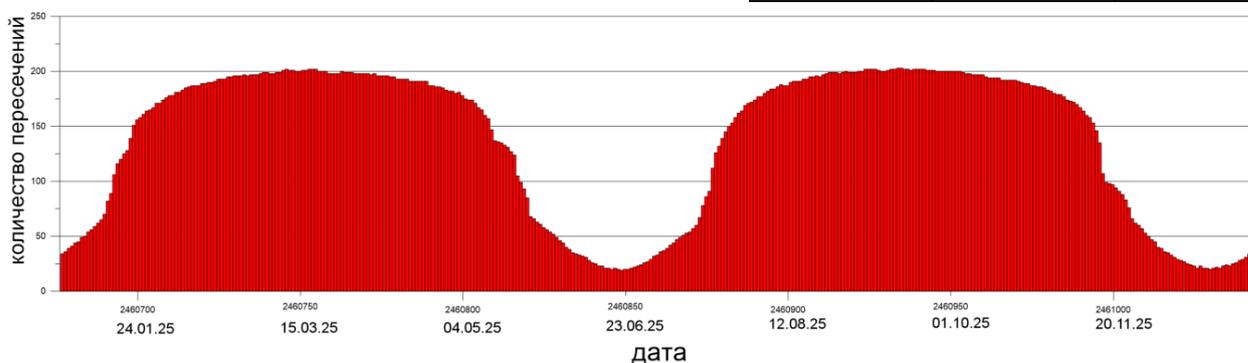


Рисунок 8.2 – Количество пересечений зон видимости КА в полярных областях на неосвещенной стороне орбиты при варьировании  $t_0$

Путем варьирования начального момента времени  $t_0$  с шагом 1 сутки (24 часа) в диапазоне 01.01.2025 – 31.12.2025 г. было выявлено, что максимальное количество пересечений зон видимости КА во время пребывания на теневой стороне орбиты в полярных зонах происходит, когда выбор  $t_0$  приходится на весну и осень (рисунок 8.2). Таким образом, в качестве начального момента времени  $t_0$  было выбрано 18.09.2025 г. [30-32].

## 8.3 Критерий и формулы расчета теневой стороны орбиты и засветки от Луны

Для учета вхождения КА в тень Земли использовались следующие условия:

$$\begin{aligned}
&\text{Если } \varphi < G_E + G_S, \\
&\left\{ \begin{array}{l} \varphi \geq G_E - G_S, \text{ полутень,} \\ \varphi < G_E - G_S, \text{ тень.} \end{array} \right. \\
&\text{Если } \varphi \geq G_E + G_S, \text{ освещен.}
\end{aligned} \tag{8.1}$$

где  $\varphi$  – это угловое расстояние относительно КА между центрами Земли и Солнца с угловыми радиусами их дисков  $G_E$  и  $G_S$ , соответственно. Радиусы дисков и угловые расстояния определяются как

$$\begin{aligned}
G_E &= \arcsin\left(\frac{R_E}{|\mathbf{x}|}\right), \quad G_S = \arcsin\left(\frac{R_S}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}_S|}\right), \\
\varphi &= \arccos\left(\frac{(\mathbf{x} - \mathbf{x}_S) \cdot \mathbf{x}}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}_S| |\mathbf{x}|}\right),
\end{aligned}$$

где  $R_E = 6402$  км,  $R_S = 696000$  км – соответствующие радиусы Земли и Солнца, а  $\mathbf{x}, \mathbf{x}_S$  – вектор положения КА и Солнца относительно центра Земли.

Формулы вычисления угла между Солнцем и Луной через скалярное произведение и определение фазы Луны

$$\varphi_{SL} = \text{ArcCos}\left(\frac{\mathbf{X}_S \cdot \mathbf{X}_L}{|\mathbf{X}_S - \mathbf{X}_L| \cdot |\mathbf{X}_L|}\right)$$

Переход к географическим координатам

$$\begin{aligned}
\varphi &= \text{ArcTan}\left(X_3 / \sqrt{X_1^2 + X_2^2}\right), \\
\lambda &= \text{ArcTan}(X_2 / X_1).
\end{aligned}$$

$$\text{Если } \begin{cases} \cos^2\left(\frac{\varphi_{SL}}{2}\right) \leq \frac{1}{2}, \\ \lambda > 0 \end{cases}, \text{ то имеем 1 или 4 четверть Луны.}$$

#### 8.4 Определение зоны общей видимости с космических аппаратов с учетом ориентации КА Зонд на Солнце

Очевидно, зона общей видимости авроральных имаджеров Авровизор\_ВИС/МП и Литиции с орбит космических аппаратов Метеор-МП и Зонда, соответственно, зависит непосредственно от взаимного расположения спутников в околоземном пространстве.

Нам заданы следующие условия:

- Поля зрения орбитальных имаджеров составляет  $\sim 30^\circ$ ;
- Три параллельных камеры, настроенных на разные эмиссии имаджера Авровизор\_ВИС/МП (с КА Метеор-МП) направлены вдоль вектора нормали от центра масс спутника до центра Земли;
- Вторая пара камер имаджера Литиции (с КА Зонд) направлена под углом  $30$  град от строительной оси КА ( $-Z$ ) в направлении в сторону Земли с учетом того, что его ось  $+Y$  всегда направлена на Солнце.

Ниже мы описываем алгоритм определения площади общей зоны видимости, который реализуется поэтапно с учетом ориентации КА Зонд на Солнце.

Сначала определяем центр зоны видимости ионосферы  $P$  для Зонда  $S$  (рисунок 8.3). Камера Зонда повернута от Солнца  $L$  на постоянный угол  $\angle PSL = \varphi + \psi + 90^\circ = 120^\circ$ , где сумма углов  $\varphi + \psi = 30^\circ$  это угол отклонения камер имаджера от строительной оси КА Зонда ( $-Z$ ). Угол  $\psi$  вычисляется как

$$\psi = 90^\circ - \theta, \quad \sin \theta = \frac{|(\mathbf{x}_L - \mathbf{x}_S) \times \mathbf{x}_S|}{|\mathbf{x}_L - \mathbf{x}_S| |\mathbf{x}_S|}, \quad \cos \theta = \frac{(\mathbf{x}_L - \mathbf{x}_S) \cdot \mathbf{x}_S}{|\mathbf{x}_L - \mathbf{x}_S| |\mathbf{x}_S|},$$

следовательно,  $\varphi = 30^\circ - \psi = \theta - 60^\circ$ . Здесь  $\mathbf{x}_S$  и  $\mathbf{x}_L$  — геоцентрические векторы положения спутника и Солнца. Чтобы получить вектор положения  $\mathbf{x}_P$  точки  $P$ , применяем преобразование поворота к вектору положения  $\mathbf{x}_{P^*} = R\mathbf{x}_S/|\mathbf{x}_S|$  подспутниковой точки  $P^*$  на угол  $\alpha$  около нормали

$$\mathbf{n} = \mathbf{e}_x = (\mathbf{x}_L \times \mathbf{x}_S) / |\mathbf{x}_L \times \mathbf{x}_S|$$

плоскости треугольника  $\Delta SOL$ , используя формулу Родрига<sup>1</sup> [33]

$$\mathbf{x}_P = \frac{R}{|\mathbf{x}_S|} [(\mathbf{n} \times \mathbf{x}_S) \sin \alpha + \mathbf{x}_S \cos \alpha],$$

где  $R$  — радиус наблюдаемого слоя ионосферы;  $\mathbf{x}_S$  — вектор положения Зонда, а угол  $\alpha$  определяется из теоремы синусов для треугольника  $PSO$ <sup>2</sup>:  $\alpha = \arcsin\left(\frac{|\mathbf{x}_S| \sin \varphi}{R}\right) - \varphi$ .

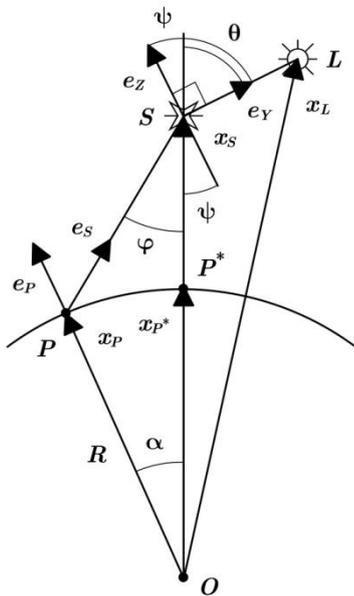


Рисунок 8.3 – Определение центра зоны видимости ионосферы  $P$ . Здесь  $S$  — спутник Зонд;  $L$  — Солнце;  $O$  — центр Земли;  $P^*$  — подспутниковая точка Зонда;  $R$  — радиус ионосферы;  $\mathbf{e}_y$  и  $\mathbf{e}_z$  — орты осей ординат и аппликат соответственно в системе координат, связанной со спутником: ось ординат  $\mathbf{e}_y$  направлена к Солнцу, ось аппликат перпендикулярна  $\mathbf{e}_z$  к ней в плоскости треугольника  $\Delta OSL$ , а ось абсцисс  $\mathbf{e}_x$  дополняет систему до правой и направлена перпендикулярно к рисунку.

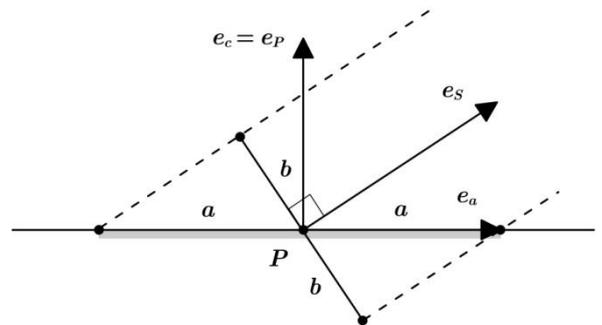


Рисунок 8.4 – Вытягивание зоны видимости вследствие наклона оптической оси камеры Зонда относительно к наблюдаемой поверхности ионосферы. Здесь  $\mathbf{e}_p$  и  $\mathbf{e}_s$  — единичные векторы, направленные перпендикулярно к ионосфере (от центра Земли) и к спутнику соответственно (см. рисунок 8.3). Область пространственного захвата спутниковой камерой показана пунктирными линиями. Единичные векторы  $\mathbf{e}_a$  и  $\mathbf{e}_c$  — орты системы координат, жестко связанной с (эллиптической) зоной видимости. Третий орт  $\mathbf{e}_b$  перпендикулярен картинной плоскости.

<sup>1</sup> В формуле отсутствует составляющая вдоль нормали, которая всегда равна нулю.

<sup>2</sup> Арксинус в формуле фактически представляет угол между направлениями  $\mathbf{e}_p$  и  $\mathbf{e}_s$ , а не угол  $\angle OPS$ , соответствующий противолежащей стороне  $|\mathbf{x}_S|$ , поскольку в программной реализации область значений тригонометрической функции от  $-90^\circ$  до  $90^\circ$ , тогда как угол  $\angle OPS$  всегда тупой.

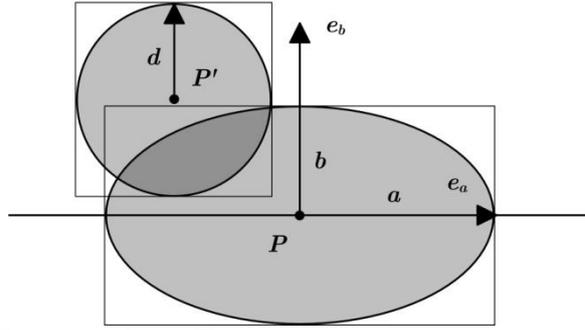


Рисунок 8.5 – Пересечение круговой и эллиптической зон видимости, а также описанные около них квадратная и прямоугольная зоны.

Поскольку оптическая ось камеры Зонда направлена под углом к поверхности ионосферы, зона ее видимости приближенно представляет собой эллипс, вытянутый вдоль направления на спутник (рисунок 8.4). Область пространства, снимаемого камерой, представляет собой конус с вершиной  $S$  и углом полураствора  $\gamma = 15^\circ$ . Следовательно, малая полуось эллипсоидальной зоны видимости  $b$  равна радиусу сечения конуса, проходящего через точку  $P$  (см. также рисунок 8.5):

$$b = |\mathbf{x}_S - \mathbf{x}_P| \operatorname{tg} \gamma.$$

Большая полуось вычисляется приближенно из допущений, что образующие конуса (пунктирные линии на рисунок 8.4) в окрестности точки  $P$  параллельны друг другу, а поверхность Земли плоская. Тогда большую полуось можно представить как

$$a = b / (\mathbf{e}_P \cdot \mathbf{e}_S),$$

где  $\mathbf{e}_P$  и  $\mathbf{e}_S$  — единичные векторы, направленные вдоль векторов  $\mathbf{x}_P$  и  $\mathbf{x}_S - \mathbf{x}_P$  соответственно.

Введем теперь систему координат  $P\mathbf{e}_a\mathbf{e}_b\mathbf{e}_c$  (рисунок 8.5), связанную с зоной видимости Зонда. В этой системе будет определяться пересечение зон видимости. Орты системы вычисляются как

$$\mathbf{e}_a = \mathbf{e}_b \times \mathbf{e}_c, \quad \mathbf{e}_b = \mathbf{e}_c \times \mathbf{e}_S, \quad \mathbf{e}_c = \mathbf{e}_P.$$

Камера Метеора-МП  $S'$  направлена к центру ионосферы  $O$ , поэтому ее оптическая ось пересекает ионосферу в подспутниковой точке  $P'$ , положение которой  $\mathbf{x}_{P'} = R\mathbf{x}_{S'} / |\mathbf{x}_{S'}|$ , где  $\mathbf{x}_{S'}$  — положение Метеора-МП. Зона видимости спутника представляет собой круг радиуса  $d$  с центром в точке  $P'$ . Углы полураствора наблюдения  $\gamma$  у Зонда и Метеора-МП одинаковые, поэтому

$$d = |\mathbf{x}_{S'} - \mathbf{x}_{P'}| \operatorname{tg} \gamma.$$

При условии  $|\mathbf{x}_{P'} - \mathbf{x}_P| < a + d$  может возникать наложение зон видимости спутников (рисунок 8.5). В этом случае переводим вектор  $\mathbf{x}_{P'}$  в систему координат  $P\mathbf{e}_a\mathbf{e}_b\mathbf{e}_c$ . Пусть  $\xi$ ,  $\eta$  и  $\zeta$  — координаты спутника в этой системе. Следовательно,

$$\mathbf{x}_{P'} - \mathbf{x}_P = \xi \mathbf{e}_a + \eta \mathbf{e}_b + \zeta \mathbf{e}_c = (\mathbf{e}_a, \mathbf{e}_b, \mathbf{e}_c) (\xi, \eta, \zeta)^T \Rightarrow (\xi, \eta, \zeta)^T = (\mathbf{e}_a, \mathbf{e}_b, \mathbf{e}_c)^T (\mathbf{x}_{P'} - \mathbf{x}_P).$$

Получить аналитические формулы для определения площади пересечения зон видимости весьма проблематично. Хотя приближенно ее можно оценить как площадь пересечения квадрата и прямоугольника, описанные около круговой и эллиптических зон соответственно, в плоской системе координат  $P\mathbf{e}_a\mathbf{e}_b$  (рис. 3). Для квадратной зоны левый нижний и правый верхний углы имеют координаты  $(\xi - d, \eta - d)$  и  $(\xi + d, \eta + d)$ ; а для

эллиптической зоны —  $(-a, -b)$  и  $(a, b)$ . Тогда для прямоугольника пересечения зон координаты углов будут

$$\xi_1 = \max(\xi - d, -a), \quad \xi_2 = \min(\xi + d, a), \quad \eta_1 = \max(\eta - d, -b), \quad \eta_2 = \min(\eta + d, b).$$

Если  $\xi_2 - \xi_1 > 0$  и  $\eta_2 - \eta_1 > 0$ , то пересечение квадратной и эллиптической зон имеет место, и площадь его определяется как  $s = (\xi_2 - \xi_1)(\eta_2 - \eta_1)$ .

### 8.5 Численные результаты

Путем численного интегрирования ДУ движения (2.1) КА Метеор-М и Зонд с шагом выдачи 1 секунда на интервале времени равным одному календарному году (18.09.2025-18.09.2026 г.) были получены результаты исследования, которые представлены в таблице ниже.

Таблица 8.2 — Пересечение зон видимости имаджеров на КА Метеор-МП и на КА Зонд

Процент пересечения площадей зон видимости	Всего в приполярных зонах	Северное полушарие		Южное полушарие		Средние широты
		70° – 80°	80° – 90°	-70° – -80°	-80° – -90°	
< 10 %	5	1	0	3	1	30
10-25 %	11	4	2	3	2	43
25-50 %	19	7	2	6	4	53
50-80 %	28	16	3	5	4	66
80-100 %	6	3	1	2	0	202

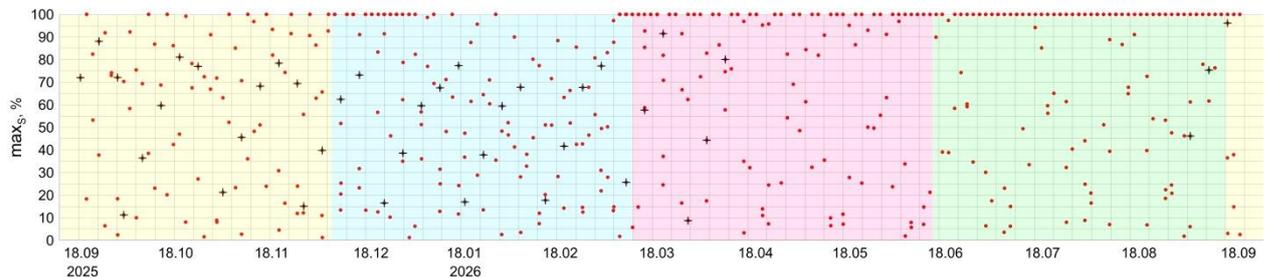
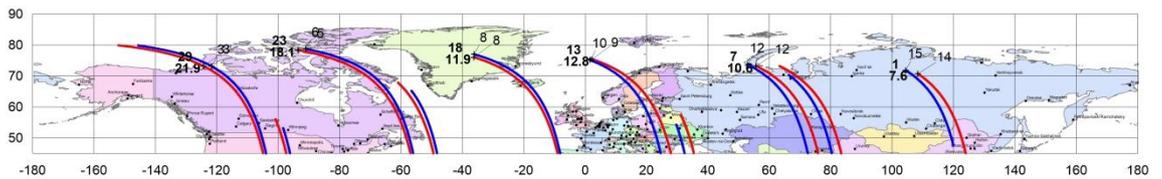


Рисунок 8.6 – Пересечения зон видимости имаджеров на КА Метеор-МП и на КА Зонд в течение одного календарного года (красные точки). Черными крестиками обозначены пересечения в приполярных зонах.

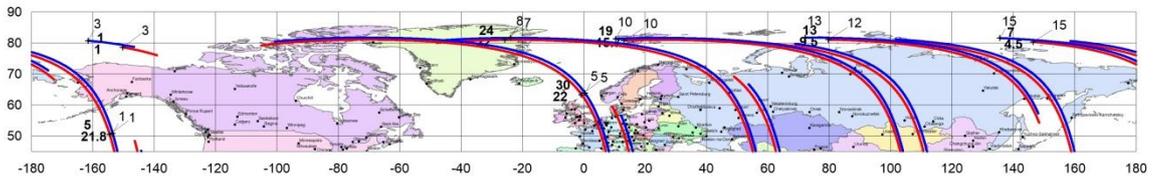
Как видно из таблицы 8.2 при данной конфигурации орбит в течение года выявлены пересечения зон видимости имаджеров на КА Метеор-МП и Зонд в приполярной зоне в количестве 69, а в средних широтах – 394.

На рисунке 8.6 красными точками выделены максимальная площадь пересечения зон видимости имаджеров на КА Метеор-МП и на КА Зонд в течение одного календарного года. Черными крестиками обозначены пересечения в приполярных зонах. Как видно из графика, КА пересекаются в северных приполярных зонах в осеннее и зимнее время, а в южном полушарии – весной и летом (на графике не отмечено).

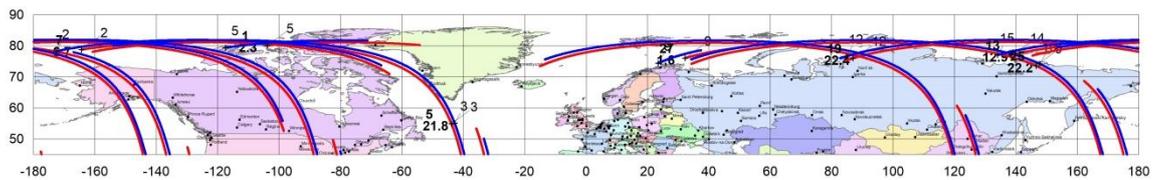
Ниже представлены графики трасс КА во время пересечения зон видимости имаджеров в северных широтах в течение одного месяца. Жирным шрифтом около трасс КА указаны: день текущего месяца и длительность пересечения областей видимости в минутах (интервал времени), обычным шрифтом – номер суточного витка Метеора и Зонда.



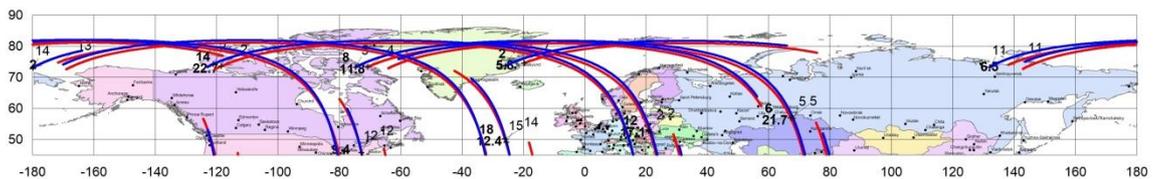
Сентябрь, 2025



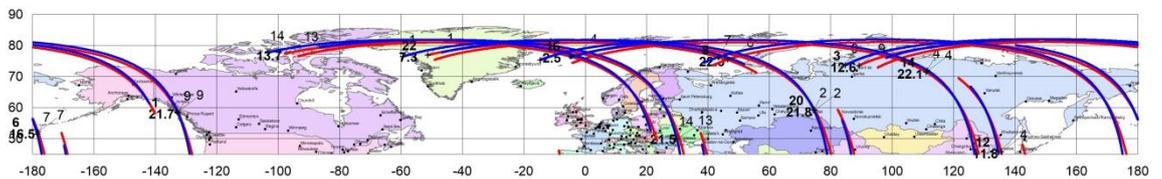
Октябрь, 2025



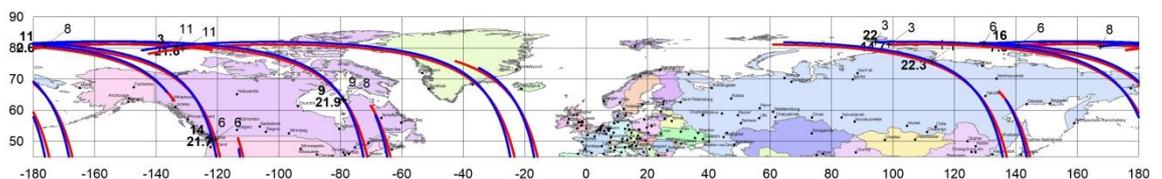
Ноябрь, 2025



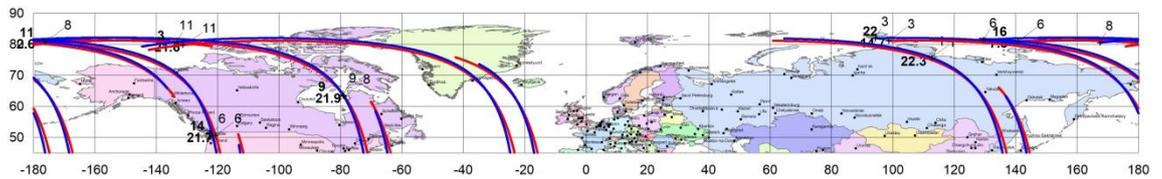
Декабрь, 2025



Январь, 2026



Февраль, 2026



Март, 2026

Рисунок 8.7 – Трассы КА Метеор\_МП (красная линия), Зонд (синия линия) во время пересечения зон видимости имаджеров в северных широтах в течение одного месяца.

Нам интересны пересечения над конкретными наземными станциями, в частности в г. Аппатиты (67°34'03" с. ш. 33°23'36" в. д.).

В таблице 8.3 представлены подробные данные пересечений зон видимости имаджеров на КА Метеор-МП и на КА Зонд в приполярной зоне северного полушария в течение одного календарного года. Это долгота и широта местности, где площадь наложения зон максимальна, номер суточного витка КА, интервал времени перекрытия зон видимости имаджеров, значение максимальной площади пересечения зон  $S_{\max}$ , дата и время.

Таблица 8.3 — Пересечение зон видимости имаджеров на КА Метеор-МП и на КА Зонд в приполярной зоне северного полушария в течение одного календарного года

Широта	Долгота	№ сут. витка Метеор	№ сут. витка Зонд	Год	Месяц	День	Час	Мин	Сек	Интервал времени, мин.	$S_{\max}$ , %
76.62	-35.91	8	8	2025	9	18	12	22	17	11.9	72.0
78.58	-91.65	5	6	2025	9	23	8	24	41	18.1	88.1
73.06	-122.23	3	3	2025	9	29	4	24	18	21.9	72.1
79.83	-155.10	3	3	2025	10	1	3	40	31	1.0	11.3
81.11	141.40	15	15	2025	10	7	23	42	57	4.5	36.4
81.52	75.75	12	13	2025	10	13	19	45	21	9.5	59.7
81.17	11.25	10	10	2025	10	19	15	47	43	15.7	81.1
81.44	-24.00	7	8	2025	10	24	11	48	52	22.0	77.0
79.87	-111.57	5	5	2025	11	1	7	5	42	2.3	21.3
78.58	-169.23	2	2	2025	11	7	3	7	57	6.7	45.6
77.05	135.60	14	15	2025	11	13	23	10	11	12.9	68.2
76.43	85.64	12	12	2025	11	19	19	12	1	22.4	78.4
74.09	147.46	9	10	2025	11	25	15	6	33	22.2	69.4
75.28	27.10	9	9	2025	11	27	14	27	43	1.6	15.1
74.16	-23.31	7	7	2025	12	2	10	29	45	5.8	39.8
73.30	-73.15	4	5	2025	12	8	6	31	43	11.8	62.4
74.01	-120.01	2	2	2025	12	14	2	33	12	22.7	73.1
73.95	-176.50	13	14	2025	12	22	21	48	36	2.0	16.5
73.70	134.62	11	11	2025	12	28	17	50	19	6.5	38.6
73.60	86.44	9	9	2026	1	3	13	52	0	12.6	59.6
75.99	44.62	6	7	2026	1	8	9	52	51	22.3	67.5
71.93	111.42	4	4	2026	1	14	5	46	32	22.1	77.3
76.03	-10.43	4	4	2026	1	16	5	8	11	2.5	17.0
76.70	-56.07	1	1	2026	1	22	1	9	37	7.3	37.8
77.54	-101.29	13	14	2026	1	28	21	11	1	13.7	59.4
80.40	-132.22	11	11	2026	2	3	17	11	29	21.6	67.8
80.78	174.69	8	8	2026	2	11	12	26	40	2.6	17.7
81.32	134.53	6	6	2026	2	16	8	27	54	7.8	41.6
81.60	95.91	3	3	2026	2	22	4	29	8	14.7	67.6
75.56	112.70	1	1	2026	2	28	0	26	58	22.3	77.2
80.43	30.69	12	13	2026	3	8	19	44	31	3.1	25.7
79.51	-8.83	10	10	2026	3	14	15	45	42	9.0	57.7
78.45	-49.63	7	8	2026	3	19	11	46	54	17.7	91.5
75.17	-93.49	5	5	2026	3	27	7	1	2	0.7	8.8
73.90	-138.71	2	2	2026	4	2	3	2	15	5.2	44.4
72.53	175.53	14	15	2026	4	8	23	3	29	12.5	80.0
71.26	105.99	14	15	2026	9	1	23	3	35	7.6	46.1
73.39	53.78	12	12	2026	9	7	19	5	58	10.6	75.3
75.12	1.60	9	10	2026	9	13	15	8	17	12.8	96.2

## 9. Использование БД в проекте «Вектор-М»

Разработка базы данных идет параллельно с разработкой приложением и постоянно связана с ним. База данных необходима в проекте «Вектор-М» для следующих целей:

- разграничение прав пользователей;
- хранение нескольких профилей пользователей для более гибкой обработки результатов и сравнение этих результатов между собой;
- хранение информации введенной пользователем;
- хранение информации о действиях пользователя;
- хранение настроек программного комплекса;
- хранение значений справочников.

Использование базы данных в программном комплексе «Вектор-М» позволяет повысить скорость обработки и качество хранения информации.

Все таблицы в базе данных имеют уникальные индексируемые ключи, которые позволяют быстро сделать выборку из таблицы. Кроме того таблицы между собой связаны по внешним ключам, что обеспечивает целочисленную целостность данных. Базу данных можно разделить по функциональности на несколько частей:

- хранение информации о пользователе, его правах и ролях;
- хранение информации о численной модели;
- хранение информации о значении справочников;
- хранение информации о работе интерфейсе;
- хранение информации о работе пользователя.

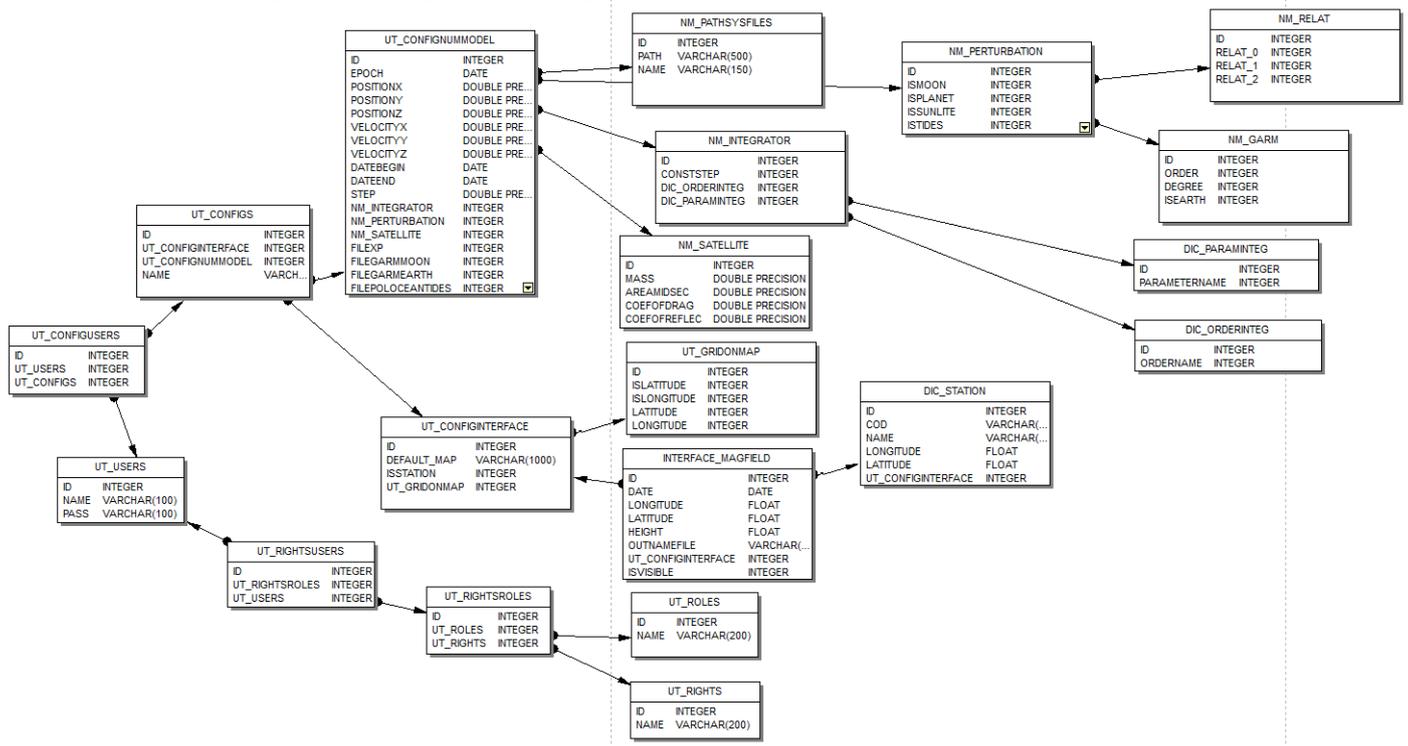


Рисунок 9.1 – Блок-схема базы данных ПО «Вектор-М»

## **Заключение**

Таким образом, на основе численной модели движения ИСЗ (НИИ ПМММ ТГУ), модели геомагнитного поля IGRF NASA и Цыганенко Н. был реализован программный комплекс Вектор-М, позволяющий проводить различные расчеты сопутствующей вдоль орбиты геофизической и астрономической информации для центра масс и пространства наблюдений в эксперименте с прибором Авровизор-ВИС/МП на КА Метеор-МП. Данный вариант программы работает до высот порядка  $60 R_E$  и для углов наклона плоскости орбиты более 90 град. Следует отметить, что данную программу можно развивать дальше для более высоких высот (Вектор-М2), используя другие модели магнитного поля.

## Список литературы

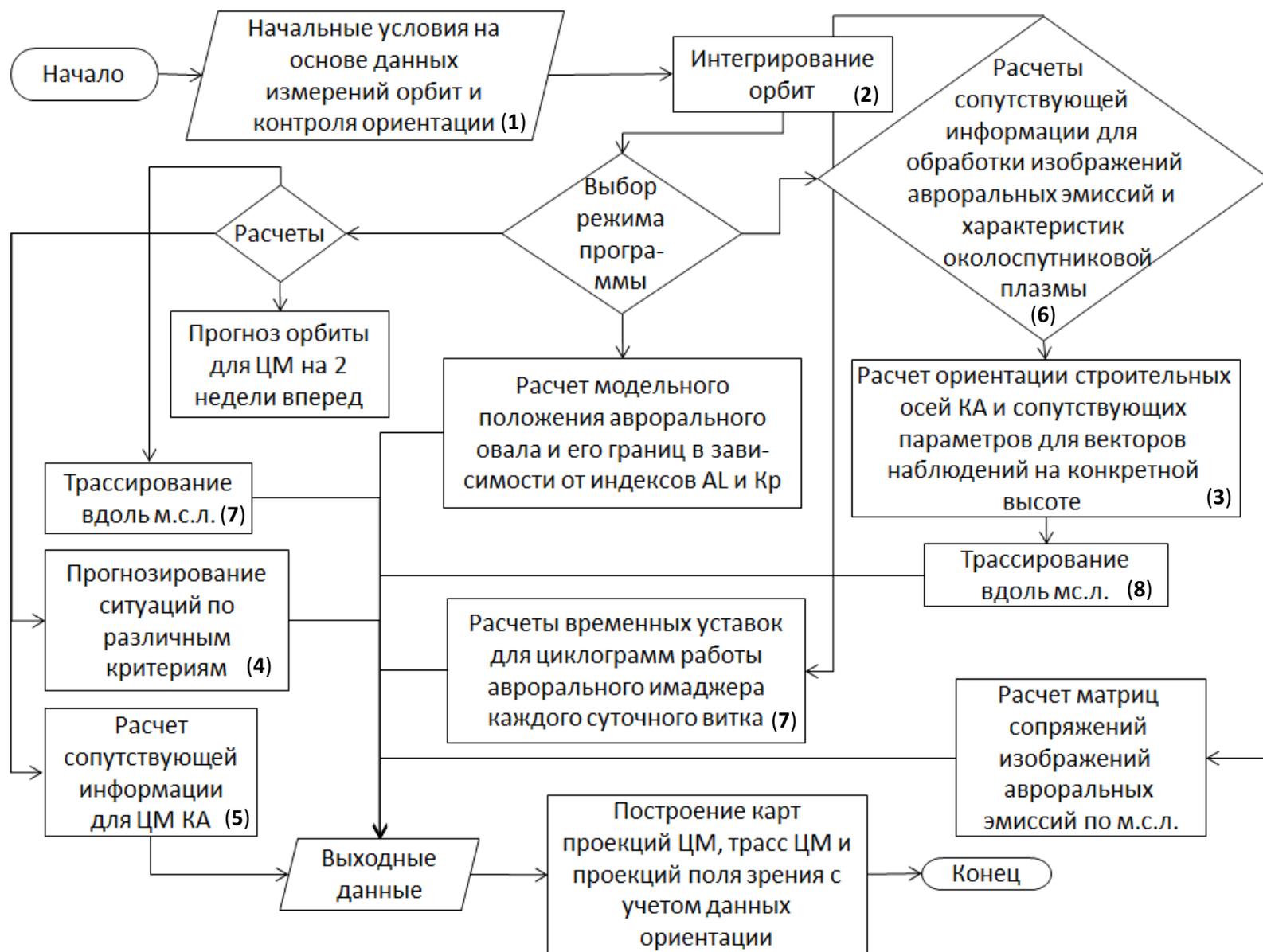
1. Гальперин Ю.И., Пономарев Ю.Н. Программа «Кадр» для расчета географических, геофизических и астрономических координат и других характеристик вдоль траектории спутника. Препринт ИКИ РАН. 1971. 32 с.
2. Гальперин Ю.И., Пономарев Ю.Н., Сеницын В.М. Некоторые алгоритмы расчета справочной геофизической информации вдоль орбит околоземных спутников. Препринт ИКИ РАН. 1980. 45 с.
3. Standish E.M. OJD Planetary and Lunar Ephemerides, DE405/LE405 // Interoffice Memorandum. V. 312. 1998. P. 1-18.
4. M.A. Hapgood, (1997) "Corrigendum to Space Physics Coordinate Transformations: A User Guide", Planet. Space Sci. 45, 1047
5. <http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html>
6. Аксенов Е.П. Теория движения искусственных спутников Земли. М.: Наука, 1977. - 360 с.
7. Бордовицына Т.В., Авдюшев В.А. Теория движения искусственных спутников Земли. Аналитические и численные методы. Учебное пособие. Томск: Изд-во Том. ун-та., 2007. - 220 с.
8. IERS Conventions 2010. Gérard Petit and Brian Luzum (eds.). (IERS Technical Note; 36) Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. 179 pp., ISBN 3-89888-989-6.
9. IERS Standarts. - IERS Technical Note. Paris: Central Bureau of IERS. – 1992. – 150 p.
10. ГОСТ Р25645.166-2004. Атмосфера Земли верхняя. Модель плотности для баллистического обеспечения полетов искусственных спутников Земли.
11. Picone M., Hedin A.E., Drob D. NRLMSISE-00 Model 2001 [Электронный ресурс]: Naval Research Laboratory. – URL: <http://modelweb.gsfc.nasa.gov/atmos/nrlmsise00.html>
12. Brumberg V.A., Ivanova T.V. Precession/Nutation solution consistent with the general planetary theory // Celest. Mech. and Dyn. Astron. – 2007. – V. 97. – P. 189–210
13. Tsyganenko, N.A., “Magnetic Field Model, FORTRAN Routines, Geopack 2008”, <http://geo.phys.spbu.ru/~tsyganenko/modeling.html>, <http://geo.phys.spbu.ru/~tsyganenko/Geopack-2008.html>
14. Tsyganenko, N. A., Modeling the Earth’s magnetospheric magnetic field confined within a realistic magnetopause, J. geophys. Res., 100, 5599, 1995.
15. Tsyganenko, N. A., Effects of the solar wind conditions on the global magnetospheric configuration as deduced from data-based field models, Eur. Space Agency Spec. Publ., ESA SP-389, 181, 1996.
16. Tsyganenko N.A. A model of the near magnetosphere with a dawn–dusk asymmetry: 1. Mathematical structure // Ibid. 2002a. V. 107. doi: 10.1029/2001JA000219.
17. Tsyganenko N.A. A model of the near magnetosphere with a dawn–dusk asymmetry: 2. Parameterization and fitting to observations // Ibid. 2002b. V. 107. 10.1029/2001JA000220
18. Hairer E., Norsett S.P., Wanner G. Solving Ordinary Differential Equations. Nonstiff Problems. Springer, 1993. 539 p.
19. Старков Г.В. Физика околоземного космического пространства. 1971. С. 429-439
20. Fred Sigernes, Margit Dyrland, Pal Brekke, Sergey Chernouss, Dag Arne Lorentzen, Kjellmar Oksavik, and Charles Sterling Deehr Two methods to forecast auroral displays // J. Space Weather Space Clim. 1 (2011) AO3
21. Joe Kinrade, Cathryn N. Mitchell, Nathan D. Smith, Yusuke Ebihara, Allan T. Weatherwax, and Gary S. Bust GPS phase scintillation associated with optical auroral emissions: First statistical results from the geographic South Pole // Journal of Geophysical Research: Space Physics, vol. 118, 2490–2502

22. Баньщикова М.А., Кузьмин А.К., Чувашов И.Н., Крученицкий Г.М. Влияние сопряжений по магнитному полю элементов изображений авроральных эмиссий на точность определения Ecp выпадающих электронов // Изв. вузов. Физика. – 2018. Т. 61. № 1. С. 132-137
23. M. A. Banshchikova, I. N. Chuvashov, A. K. Kuzmin, and G. M. Kruchenitskii Influence of magnetically conjugate fragments of Auroral emission images on the accuracy of Determining Eav of precipitating electrons // Russian Physics Journal, Vol. 61, No. 1, May, 2018 (Russian Original No. 1, January, 2018). P. 150-156
24. Баньщикова М.А., Чувашов И.Н., Кузьмин А.К., Крученицкий Г.М., Влияние сопряжений по магнитному полю элементов изображений авроральных эмиссий на точность определения Ecp выпадающих электронов. Изв. Вузов, Физика, т.61, №1, с.132-137, 2018. <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/201801.pdf>
25. 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 реконструкции 3D-распределений эмиссий, получаемых с разных позиций имаджеров, Вопросы электромеханики, т.158, №3, с.7-21, 2017. <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/201703.pdf>
26. Кузьмин А.К. Дистанционная спектрофотометрическая диагностика характеристик авроральной ионосферы с орбит перспективных космических аппаратов, ИКИ РАН, Пр-2161, 49 с., 2011. [iki.rssi.ru/books/2011kuzmin.pdf](http://iki.rssi.ru/books/2011kuzmin.pdf)
27. Кузьмин А.К., Баньщикова 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. ИКИ РАН «Практические аспекты гелиогеофизики», 2016, стр.114-133. <http://iki.cosmos.ru/books/2016gelioph.pdf>
28. Obuchi Y., Sakanoi T., Yamazaki A., Ino T., Okano S., Kasaba Y., Hirahara M., Kanai Y., Takeyama N., Initial observations of auroras by multi-spectral auroral camera on board the REIMEI satellite, Earth Planet Space, 60, №8, pp.827-835, 2008.
29. 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.
30. Дурнева Е.Ю., Попандопуло Н.А., Баньщикова М.А. Определение наилучших конфигураций орбит и даты запуска космических аппаратов // VII Международная молодежная научная конференция «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики – 2017», г. Томск, 16–18 ноября 2017 г. стр.
31. Дурнева Е.Ю., Попандопуло Н.А., Баньщикова М.А., Чувашов И.Н. Определение условий максимального попадания в тень двух космических аппаратов во время одновременных наблюдений ионосферы в полярных зонах // Сборник тезисов конференции «Научно-техническая конференция молодых специалистов АО «ИСС»», IV НТК МС, г. Железногорск, 2017, стр. 182-184.
32. Дурнева Е.Ю., Попандопуло Н.А., Баньщикова М.А. Определение интервалов нахождения в тени двух космических аппаратов на разных высотах в северной и южной полярных зонах во время одновременных наблюдений ионосферы в течение одного календарного года // Материалы 23 всероссийской конференции ВНКСФ, Екатеринбург, 29.03-04.04.2017 г. стр. 285-286
33. Rodrigues O. Des lois géométriques qui régissent les déplacements d'une système solide dans l'espace et de la variation des coordonnées provenant de ces déplacements considérés

indépendamment des causes qui peuvent les produire // Liouville's Journ. Math.. — 1840. — Vol. 5. — P. 380—440.

34. Кузьмин А.К., Баньщикова М.А., Чувашов И.Н. Анализ ситуаций взаимного расположения КА Зонд и КА Метеор-МП на их орбитах и перспектива использования неординарных условий одновременных наблюдений эмиссий полярных сияний с разных позиций авроральных имаджеров Авровизор-ВИС-МП и Летиция // 12 ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной системе» 6-10 февраля 2017, стр. 305.
35. V. A. Avdyushev, M. A. Banshchikova, I. N. Chuvashov, A. K. Kuzmin Capabilities of software “Vector-M” for a diagnostics of the ionosphere state from auroral emissions images and plasma characteristics from the different orbits as a part of the system of control of space weather // EPSC Abstract, Vol. 11, EPSC2017-834-1, 2017. European Planetary Science Congress 2017. 17–22 September 2017

Приложение 1. Блок-схема программного обеспечения «Вектор-М» [35]



**(1)**

В качестве начальных данных ПО Вектор-М являются:

1. Начальные орбитальные параметры КА.
2. Параметры геомагнитного поля и атмосферы.
3. Фазовый угол Луны.
4. Координаты станций наблюдений.
5. Данные ориентации КА, получаемые на ночной и освещенной сторонах орбиты.
6. Для прибора: конкретные углы полей зрения каналов, углы оптических осей каналов со строительными осями КА.

**(2)**

При использовании численной модели движения КА и ее внутренних библиотек производится расчет положения ц.м. КА:

1. В конкретные моменты времени.
2. В конкретном интервале времени.
3. Прогноз на 1 месяц вперед.

**(3)**

Расчет для конкретных векторов наблюдения конкретного канала прибора (в рамках угла поля зрения, количества элементов изображения) с учетом привязки углов к строительным осям КА и текущих углов ориентации строительных осей КА в пространстве.

**(4)**

Расчет взаимного расположения конкретных КА в пространстве:

1. В заданных пределах по широте (географ., геомагн.)
2. Географ. и геомагн. местному времени.
3. По высоте.
4. По пересечению северного и южного авроральных овалов.
5. По пролету над конкретными заданными точками на поверхности Земли.
6. По освещенности (Солнцем, лунной) с расчетом их зенитных и азимутальных углов с осью прибора (в надир).
7. Множество других ситуаций.

**(5)**

Расчет для ЦМ КА:

1. Географических, геомагнитных и астрономических параметров,
  2. Координат КА в различных системах координат.
  3. Астрономических параметров для Солнца, Луны,
  4. Конкретного вектора и соответствующих параметров,
- Список параметров выбирается пользователем по запросу из каталога.

**(6)**

Расчет для ЦМ КА:

1. Географических, геомагнитных и астрономических параметров,
  2. Координат КА в различных системах координат.
  3. Астрономических параметров для Солнца, Луны,
  4. Конкретного вектора и соответствующих параметров,
- Список параметров выбирается пользователем по запросу из каталога.

**(7)**

Трассирование:

1. Вдоль магнитной силовой линии,
2. От ЦМ до заданной высоты или до поверхности Земли,
3. До нескольких высот,
4. Трассирование для построения матриц сопряжения (по магнитному полю) всех пикселей изображения в любом из каналов прибора.

**(8)**

Трассирование:

1. Вдоль магнитной силовой линии,
  2. От ЦМ до заданной высоты или до поверхности Земли,
  3. До нескольких высот,
- Трассирование для построения матриц сопряжения (по магнитному полю) всех пикселей изображения в любом из каналов прибора.

**Приложение 2. Сравнительное испытание эскизного варианта диалоговой программы расчетов навигационных и некоторых геофизических параметров «Вектор-М» по одним и тем же начальным условиям орбиты КА «ИК-Болгария-1300»**

Тестирование эскизного проекта новой диалоговой программы «Вектор-М» заключается в сравнении результатов расчета ряда параметров орбиты, полученных с помощью программы «Вектор-М» и программы «КАДР-3» по одним и тем же начальным условиям для расчета орбиты. Результаты сравнения могут считаться удовлетворительными, если имеются совпадения в угловых параметрах порядка 1 градуса, в векторе положения спутника – порядка 1 км, в остальных параметрах, связанных с геомагнитным полем – до первого знака после запятой. Испытания проводились на примере расчета параметров для спутника Интеркосмос-Болгария-1300. Круговая орбита (высота ~830 км). Орбита этого КА была выбрана исходя из близости ее параметров к параметрам орбиты КА Метеор-МП. Главное отличие между орбитами КА Метеор-МП и КА ИК-Болгария-1300 состоит в угле наклона плоскости орбиты к плоскости экватора ( $i=98^\circ$  для КА Метеор-МП и  $i=82^\circ$  для КА Интеркосмос-Болгария-1300). Начальные условия были предоставлены сотрудником ИКИ РАН Кузьминым А.К.

<b>Интеркосмос-Болгария-1300. Высота ~830 км</b>		
<b>Начальные данные</b>	<b>I</b>	<b>II</b>
Номер витка	2864	2868
Дата (год, мес, день)	820226.	820226.
Время (мск) (час, мин, сек)	06.33.267	13.20.594
Баллистич. коэфф. (торможен.)	0,02	0,02
Большая полуось (метры)	7229572.5	7229571.6
Эксцентриситет	0,0078756282	0.0078742151
Угол наклона (град.)	81.229276	81.229277
Аргум. перигея	-15.201361	-15.479311
Долгота восх. узла	63.966098	63.283532

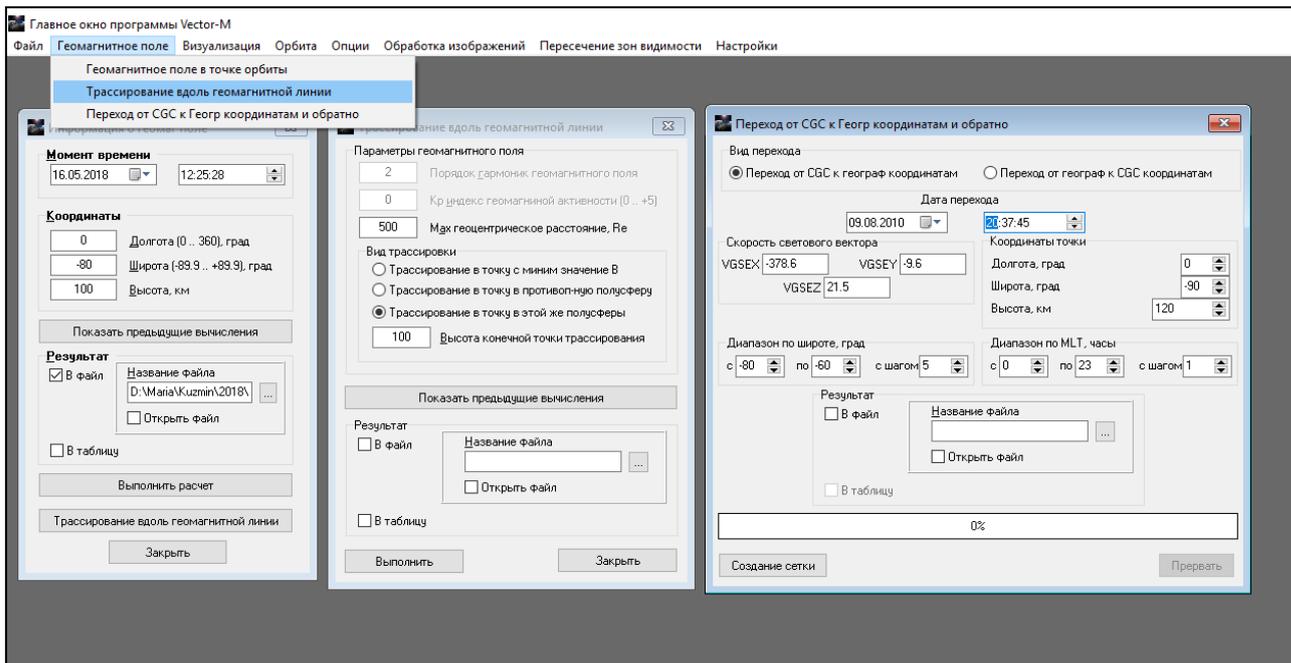
Сравнение вычисленных параметров программ КАДР-3 и «Вектор-М» представлены в таблице ниже.

<b>Интеркосмос-Болгария-1300. Высота ~830 км</b>				
<b>Параметр</b>	<b>I</b>		<b>II</b>	
	<b>КАДР-3</b>	<b>Вектор-М</b>	<b>КАДР-3</b>	<b>Вектор-М</b>
ALT	830	830	830	830
LAT	-15.2	-15.2	-15.48	-15.48
LONG	63.97	63.97	63.28	63.28
L	1.33	1.320	1.337	1.327
L0	29.886	29.504	30.151	29.767
BX MAG * 10 <sup>(-3)</sup>	179.902	180.642	178.012	178.755
BY MAG * 10 <sup>(-3)</sup>	-38.360	-38.101	-38.464	-38.221
BZ MAG * 10 <sup>(-3)</sup>	-189.558	-189.157	-189.898	-189.157
D MAG	-12.037	-11.910	-12.193	-12.069
I MAG	-45.861	-45.695	-46.198	-46.034
B MAG * 10 <sup>(-3)</sup>	264.137	264.318	263.114	263.309
LD	-27.260	-22.858	-27.535	-23.0352
COSPEQ	0.706	0.6982	0.711	0.702

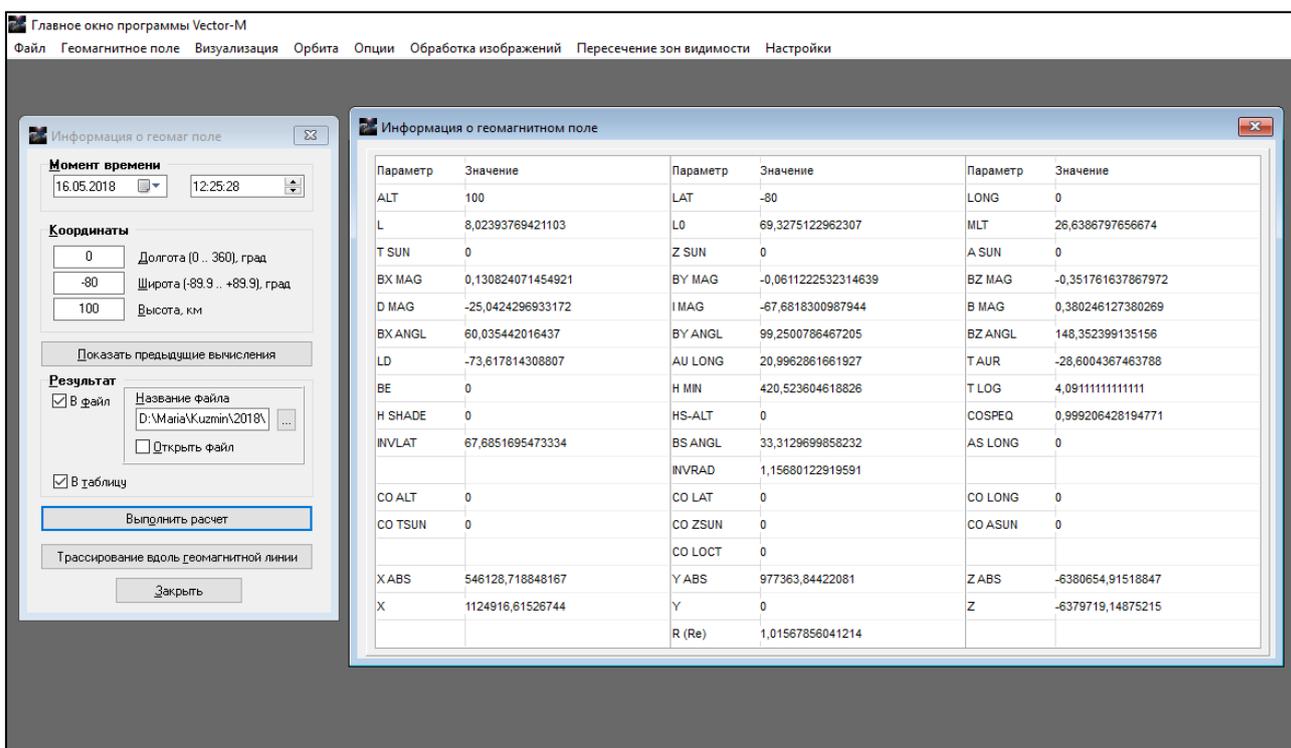
INVLAT	23.079	22.704	23.289	22.912
BS ANGLE	47.218	47.317	77.372	77.469
INVRAD	1.126	1.123	1.128	1.125
X ABS	5179676.944	5200475.4607	3517435.880	3495537.354
Y ABS	-4645578.552	-4623291.3827	5992443.363	6005096.583
Z ABS	-1877726.879	-1880814.9872	-1911496.585	-1917620.107
X	3053356.104	3052569.9722	3124262.330	3123428.7749
Y	6251997.267	6250378.5984	6206506.063	6204850.1637
Z	-1877726.879	-1889895.4146	-1911496.585	-1923865.9978
R (Re)	1.131	1.1301	1.131	1.1301

Незначительные отличия связаны с использованием в «Вектор-М» других моделей, например, высокоточной численной модели движения спутника, модели геомагнитного поля (IGRF Model, NASA). Например, параметр L (в таблице выделен желтым цветом) получен с помощью модели НАСА геомагнитного поля, параметр BS ANGLE (в таблице выделен зеленым цветом) вычислен по формулам из препринта [1], но с использованием значений полученных также из модели НАСА геомагнитного поля, координата спутника во вращающейся с.к. X (в таблице выделен голубым цветом) получена с помощью нашей высокоточной численной модели движения ИСЗ. Как видно, отличия значений данных параметров полученных двумя программами незначительны и удовлетворяют требованиям.

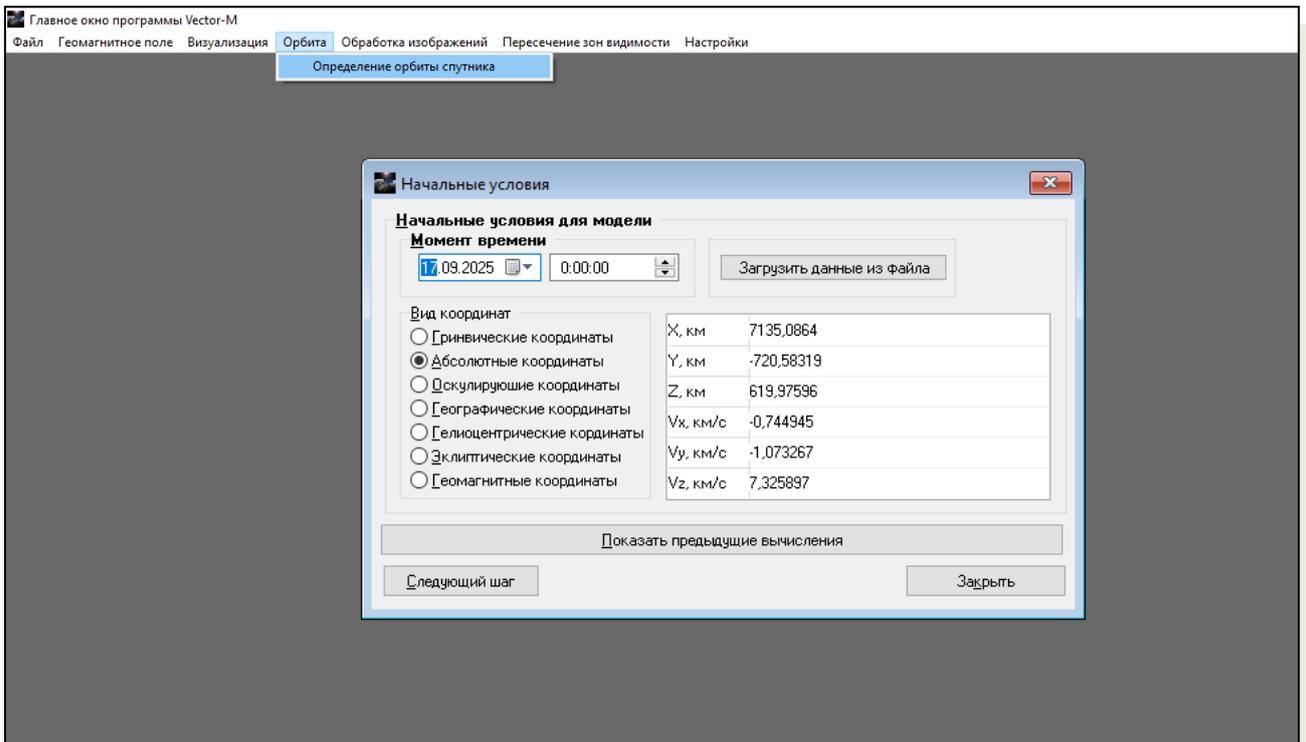
## Приложение 3 Интерфейс ПК Вектор-М



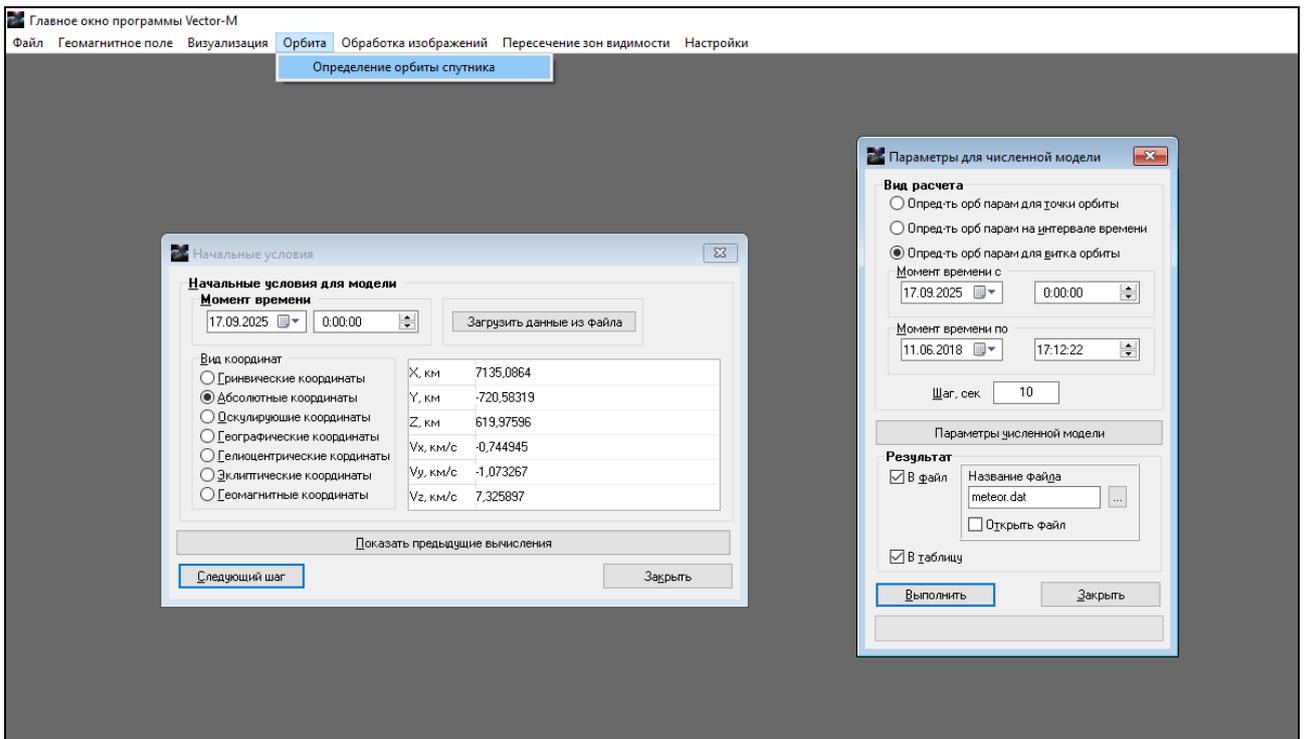
Вычисление параметров геомагнитного поля – выбор параметров.



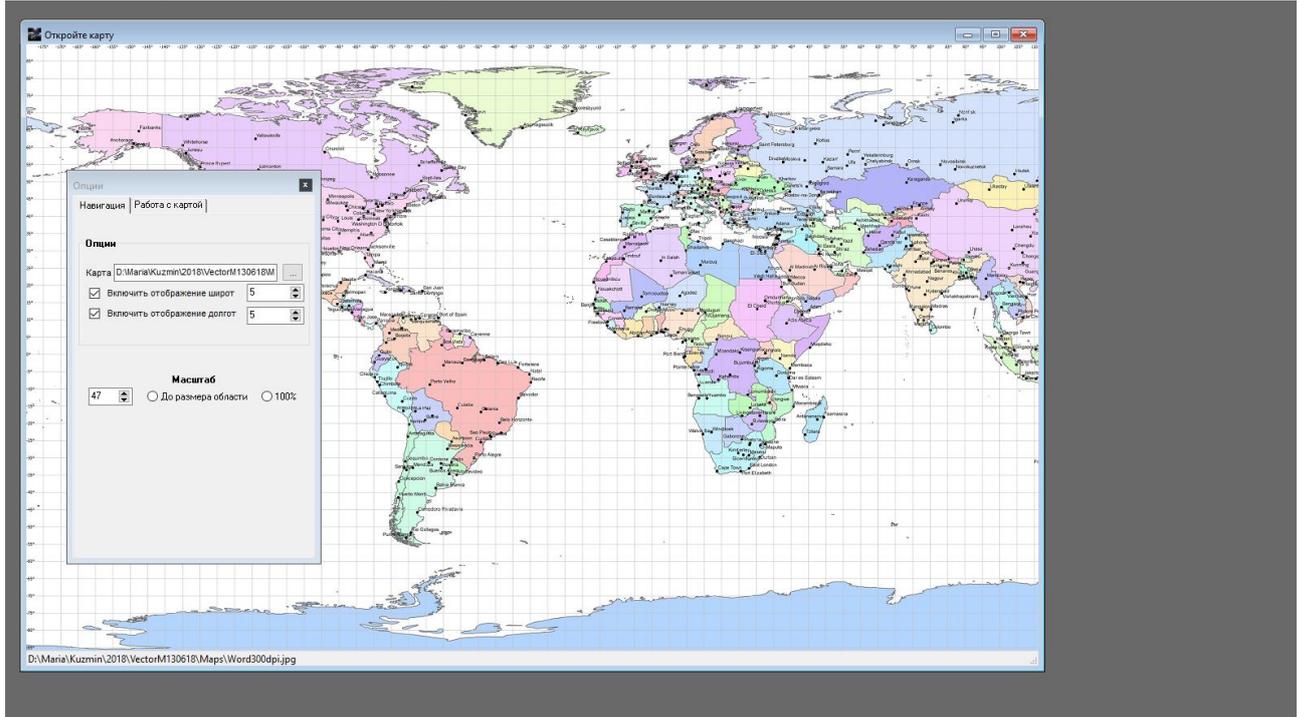
Вычисление параметров геомагнитного поля – результат.



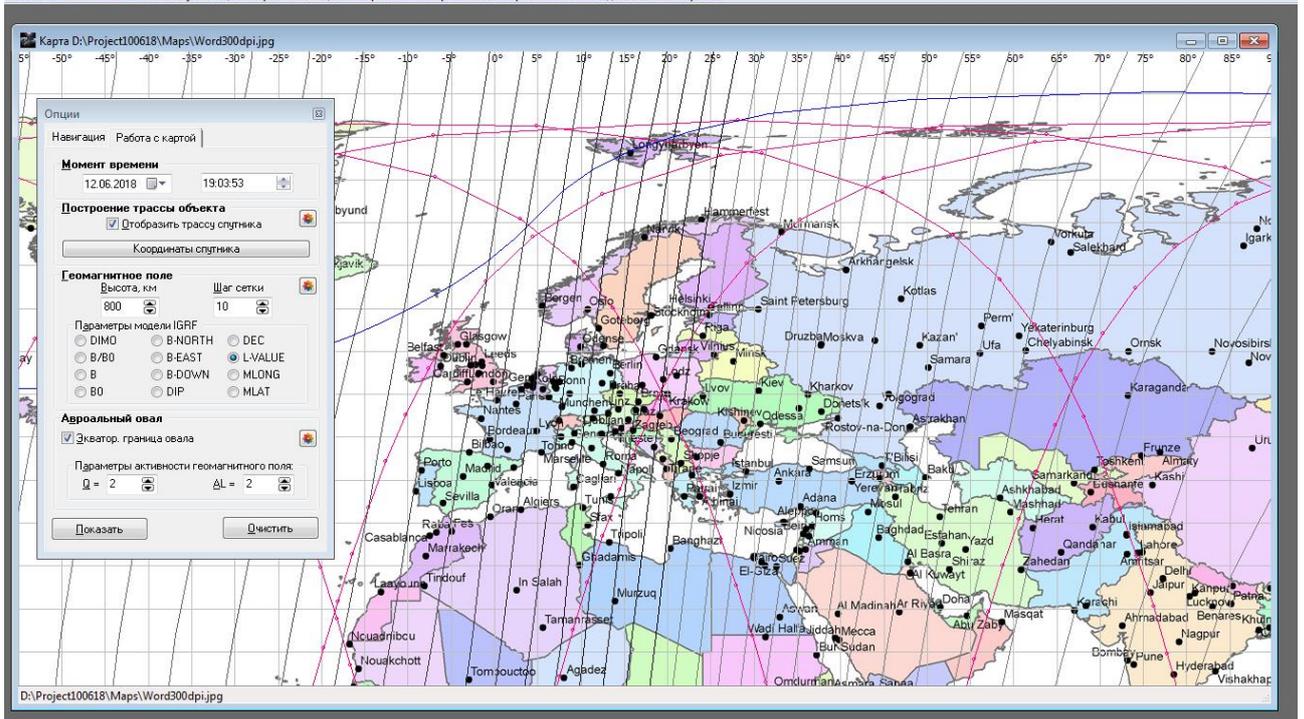
Расчет положения спутника на орбите – выбор параметров  
(перевод координат из одной системы в другую)



Расчет положения спутника на орбите – выбор параметров.

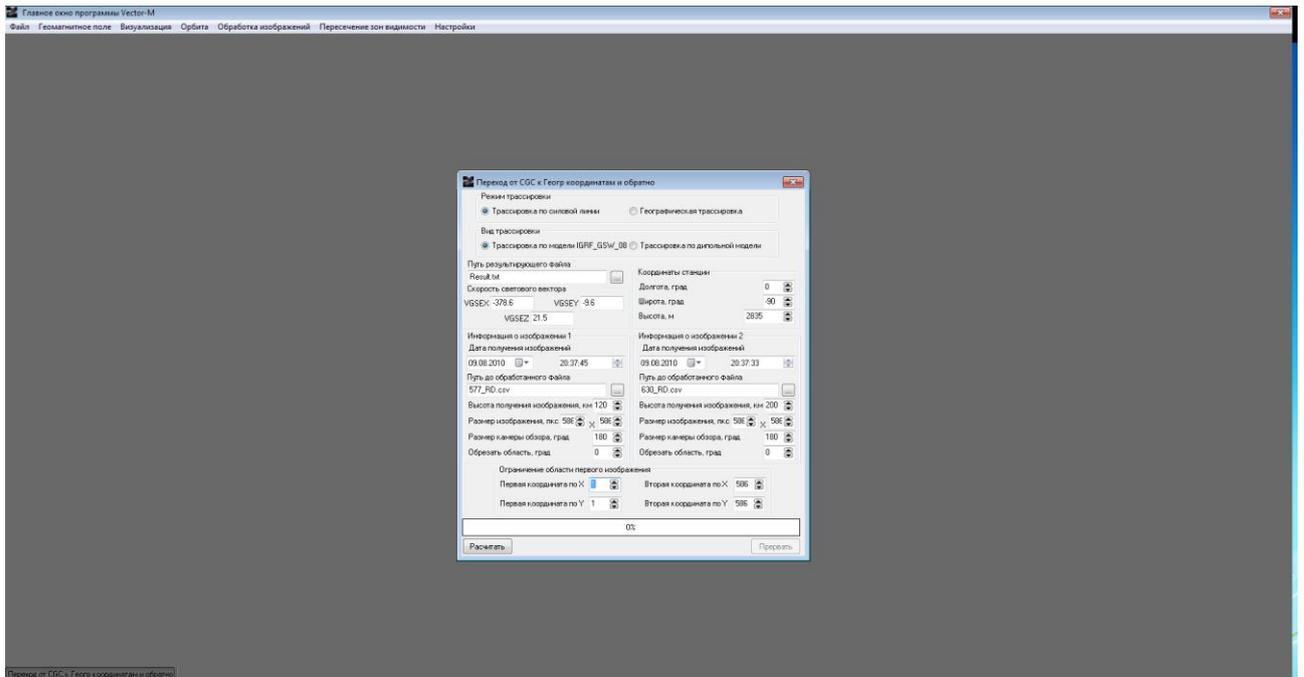


Работа с картой – пустое поле, масштаб.

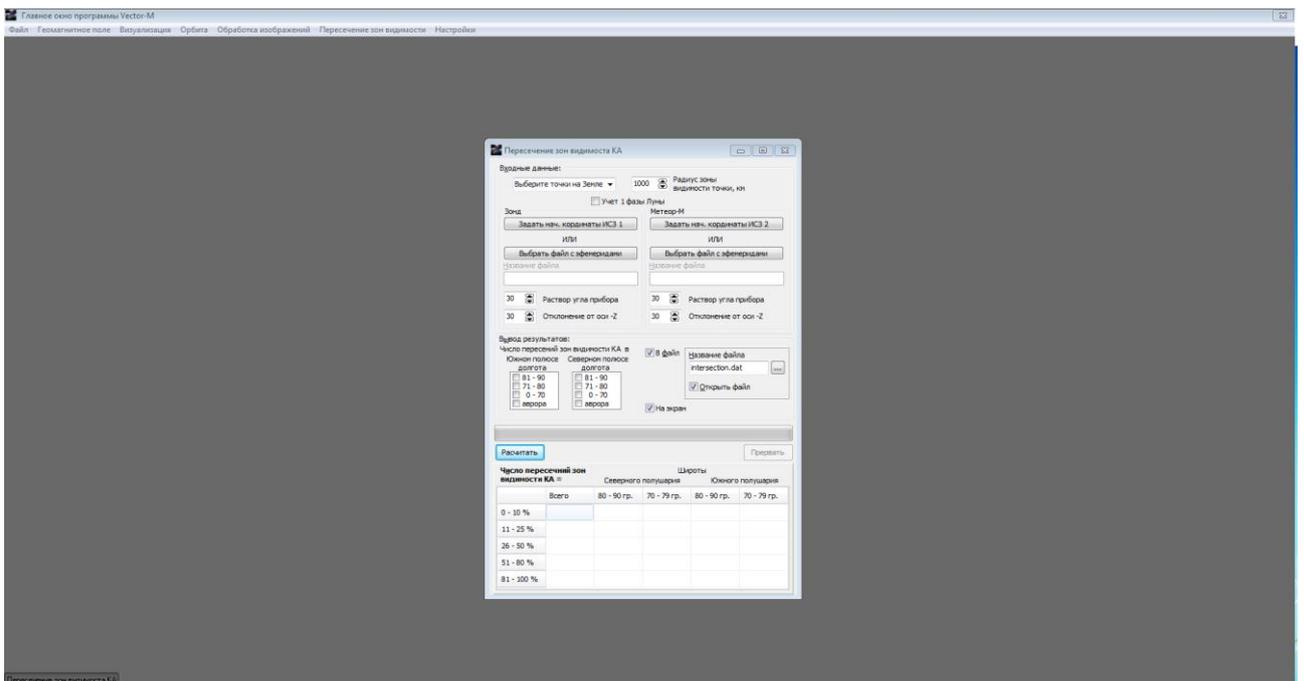


Работа с картой – трасса спутника.





Расчет матриц сопряжений изображений авроральных эмиссий по магнитной силовой линии полученных с наземных станций



Пересечение зон видимости КА с учетом различных условий

**Уважаемый пользователь!**

Обращаем ваше внимание, что система Антиплагиат отвечает на вопрос, является ли тот или иной фрагмент текста заимствованным или нет. Ответ на вопрос, является ли заимствованный фрагмент именно плагиатом, а не законной цитатой, система оставляет на ваше усмотрение. Также важно отметить, что система находит источник заимствования, но не определяет, является ли он первоисточником.

**Информация о документе:**

**Имя исходного файла:** Banshchikova\_mag\_2018.pdf  
**Имя компании:** Томский гос. Университет  
**Комментарий:** Магистерская диссертация Баньшиковой М.А.  
**Тип документа:** Прочее  
**Имя документа:** РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА АВРОВИЗОР-ВИС/МП НА КА МЕТЕОР-МП  
**Дата проверки:** 13.06.2018 06:24  
 Научные статьи Elibrary, Интернет (Антиплагиат), Модуль поиска ЭБС "Консультант студента", Модуль поиска ЭБС "Айбукс", Модуль поиска ЭБС "Лань", Томский гос. Университет, Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика, Университетская библиотека онлайн, Кольцо вузов  
**Модули поиска:**

**Текстовые****статистики:****Индекс читаемости:** обычный**Неизвестные слова:** в пределах нормы**Макс. длина слова:** в пределах нормы**Большие слова:** в пределах нормы

<input type="checkbox"/>	Источник	Ссылка на источник	Коллекция/ модуль поиска	Доля в отчёте	Доля в тексте
<input type="checkbox"/>	[1] Прикладная программн...	<a href="http://elibrary.ru/item.asp?id=19012425">http://elibrary.ru/item.asp?id=19012425</a>	Научные статьи Elibrary	0	3,16%
<input checked="" type="checkbox"/>	[2] ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВА...	<a href="http://lib.knigi-x.ru/23tehnicheskie/572125-1-chislennoe-mod...">http://lib.knigi-x.ru/23tehnicheskie/572125-1-chislennoe-mod...</a>	Интернет (Антиплагиат)	3,09%	3,09%
<input checked="" type="checkbox"/>	[3] Бордовицына Т.В., Ав...	<a href="http://iaaras.ru/media/library/isz_2.pdf">http://iaaras.ru/media/library/isz_2.pdf</a>	Интернет (Антиплагиат)	2%	2,49%
<input checked="" type="checkbox"/>	[4] ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДВИЖ...	<a href="http://elibrary.ru/item.asp?id=16045080">http://elibrary.ru/item.asp?id=16045080</a>	Научные статьи Elibrary	0,48%	1,9%
<input checked="" type="checkbox"/>	[5] ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ...	<a href="http://elibrary.ru/item.asp?id=16221167">http://elibrary.ru/item.asp?id=16221167</a>	Научные статьи Elibrary	1,35%	1,35%
<input checked="" type="checkbox"/>	[6] В.В. Калегаев. Динам...	<a href="http://ru.iszf.irk.ru/images/0/03/60-69%D0%9A%D0%B0%D0%BB%D0...">http://ru.iszf.irk.ru/images/0/03/60-69%D0%9A%D0%B0%D0%BB%D0...</a>	Интернет (Антиплагиат)	0%	1,35%
<input type="checkbox"/>	[7] Dissertation To...	<a href="https://disser.spbu.ru/disser2/disser/Dissertation_Tomilova....">https://disser.spbu.ru/disser2/disser/Dissertation_Tomilova....</a>	Интернет (Антиплагиат)	0	1,26%
<input type="checkbox"/>	[8] Источник 8	<a href="http://hea.iki.rssi.ru/~nick/astro/scecl.htm">http://hea.iki.rssi.ru/~nick/astro/scecl.htm</a>	Интернет (Антиплагиат)	0	1,22%
<input checked="" type="checkbox"/>	[9] МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВ...	<a href="http://libed.ru/dissertatsiya/1201283-1-ministerstvo-obrazov...">http://libed.ru/dissertatsiya/1201283-1-ministerstvo-obrazov...</a>	Интернет (Антиплагиат)	0,65%	1,08%
<input checked="" type="checkbox"/>	[10] Моделирование Drf-ва...	<a href="http://elibrary.ru/item.asp?id=9292793">http://elibrary.ru/item.asp?id=9292793</a>	Научные статьи Elibrary	0,01%	1,08%
<input type="checkbox"/>	[11] ВЛИЯНИЕ СЖАТИЯ ЗЕМЛИ...	<a href="http://elibrary.ru/item.asp?id=24035680">http://elibrary.ru/item.asp?id=24035680</a>	Научные статьи Elibrary	0	1,01%
<input type="checkbox"/>	[12] 2 ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРО...	<a href="http://lib.knigi-x.ru/23tehnicheskie/572125-2-chislennoe-mod...">http://lib.knigi-x.ru/23tehnicheskie/572125-2-chislennoe-mod...</a>	Интернет (Антиплагиат)	0	0,98%
<input type="checkbox"/>	[13] 3 ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕК...	<a href="http://lib.knigi-x.ru/23fizika/216087-3-prakticheskie-aspekt...">http://lib.knigi-x.ru/23fizika/216087-3-prakticheskie-aspekt...</a>	Интернет (Антиплагиат)	0	0,85%
<input checked="" type="checkbox"/>	[14] Машиностроение. Раке...	<a href="http://www.studentlibrary.ru/doc/ISBN9785942755898-SCN0000.h...">http://www.studentlibrary.ru/doc/ISBN9785942755898-SCN0000.h...</a>	Модуль поиска ЭБС "Консультант студента"	0,13%	0,72%
<input checked="" type="checkbox"/>	[15] Машиностроение. Энци...	<a href="http://ibooks.ru/reading.php?short=1&amp;productid=339615">http://ibooks.ru/reading.php?short=1&amp;productid=339615</a>	Модуль поиска ЭБС "Айбукс"	0%	0,71%
<input type="checkbox"/>	[16] 59417	<a href="http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=59417">http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=59417</a>	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0	0,69%
<input type="checkbox"/>	[17] Disser Yanz 2014.pd...		Томский гос. Университет	0	0,64%
<input type="checkbox"/>	[18] 59420	<a href="http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=59420">http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=59420</a>	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0	0,6%
<input type="checkbox"/>	[19] 634	<a href="http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=634">http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=634</a>	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0	0,6%
<input checked="" type="checkbox"/>	[20] 50289	<a href="http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=50289">http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=50289</a>	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0%	0,59%
<input checked="" type="checkbox"/>	[21] Справочник по матема...	<a href="http://www.studentlibrary.ru/doc/ISBN9785222220795-SCN0000.h...">http://www.studentlibrary.ru/doc/ISBN9785222220795-SCN0000.h...</a>	Модуль поиска ЭБС "Консультант студента"	0,33%	0,59%
<input checked="" type="checkbox"/>	[22] Научно-технический в...	<a href="http://www.bibliorossica.com/book.html?&amp;currBookId=17603">http://www.bibliorossica.com/book.html?&amp;currBookId=17603</a>	Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика	0%	0,59%
<input checked="" type="checkbox"/>	[23] Основы устройства и ...	<a href="http://www.bibliorossica.com/book.html?&amp;currBookId=8768">http://www.bibliorossica.com/book.html?&amp;currBookId=8768</a>	Модуль поиска	0%	0,59%

			ЭБС БиблиоРоссика		
<input checked="" type="checkbox"/>	[24] <a href="#">622</a>	<a href="http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=622">http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=622</a>	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0%	0,58%
<input checked="" type="checkbox"/>	[25] <a href="#">Полный текст диссерт...</a>	<a href="https://istina.msu.ru/download/16978031/1e9nqZ:dXm5XoMNEEapU...">https://istina.msu.ru/download/16978031/1e9nqZ:dXm5XoMNEEapU...</a>	Интернет (Антиплагиат)	0%	0,58%
<input checked="" type="checkbox"/>	[26] <a href="#">Источник 26</a>	<a href="http://www.dp5.ru/SearchBaseRKD/hm/www.dp5.ru_0000066434.ht...">http://www.dp5.ru/SearchBaseRKD/hm/www.dp5.ru_0000066434.ht...</a>	Интернет (Антиплагиат)	0,58%	0,58%
<input type="checkbox"/>	[27] <a href="#">59894</a>	<a href="http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=59894">http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=59894</a>	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0	0,58%
<input checked="" type="checkbox"/>	[28] <a href="#">Неравенства. Методы ...</a>	<a href="http://www.studentlibrary.ru/doc/ISBN5922102737-SCN0000.html">http://www.studentlibrary.ru/doc/ISBN5922102737-SCN0000.html</a>	Модуль поиска ЭБС "Консультант студента"	0%	0,58%
<input checked="" type="checkbox"/>	[29] <a href="#">Источник 29</a>	<a href="http://space.kursknet.ru/ts_kelso/russian/v02n01/v02n01.sht">http://space.kursknet.ru/ts_kelso/russian/v02n01/v02n01.sht</a>	Интернет (Антиплагиат)	0,57%	0,57%
<input checked="" type="checkbox"/>	[30] <a href="#">Предельное состояние...</a>	<a href="http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&amp;id=68972">http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&amp;id=68972</a>	Университетская библиотека онлайн	0%	0,57%
<input checked="" type="checkbox"/>	[31] <a href="#">Короткие замыкания и...</a>	<a href="http://www.studentlibrary.ru/doc/ISBN9785383007099-SCN0000.h...">http://www.studentlibrary.ru/doc/ISBN9785383007099-SCN0000.h...</a>	Модуль поиска ЭБС "Консультант студента"	0%	0,57%
<input checked="" type="checkbox"/>	[32] <a href="#">71812</a>	<a href="http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&amp;id=71812">http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&amp;id=71812</a>	Университетская библиотека онлайн	0%	0,57%
<input type="checkbox"/>	[33] <a href="#">ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСК...</a>	<a href="http://elibrary.ru/item.asp?id=18040421">http://elibrary.ru/item.asp?id=18040421</a>	Научные статьи Elibrary	0	0,56%
<input checked="" type="checkbox"/>	[34] <a href="#">Перспективные информ...</a>	<a href="http://elibrary.ru/item.asp?id=23737499">http://elibrary.ru/item.asp?id=23737499</a>	Научные статьи Elibrary	0,03%	0,56%
<input type="checkbox"/>	[35] <a href="#">Баллистика и наведен...</a>	<a href="http://www.bibliorossica.com/book.html?&amp;currBookId=18739">http://www.bibliorossica.com/book.html?&amp;currBookId=18739</a>	Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика	0	0,56%
<input checked="" type="checkbox"/>	[36] <a href="#">103866</a>	<a href="http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&amp;id=103866">http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&amp;id=103866</a>	Университетская библиотека онлайн	0%	0,53%
<input checked="" type="checkbox"/>	[37] <a href="#">Сборник тезисов - вс...</a>	<a href="http://mipt.ru/science/conf/archive/conf49/z49/f_2mgg2k/f_2p...">http://mipt.ru/science/conf/archive/conf49/z49/f_2mgg2k/f_2p...</a>	Интернет (Антиплагиат)	0%	0,51%
<input checked="" type="checkbox"/>	[38] <a href="#">231600</a>	<a href="http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&amp;id=231600">http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&amp;id=231600</a>	Университетская библиотека онлайн	0%	0,5%
<input checked="" type="checkbox"/>	[39] <a href="#">Дистанционная спектр...</a>	<a href="http://www.iki.rssi.ru/books/2011kuzmin.pdf">http://www.iki.rssi.ru/books/2011kuzmin.pdf</a>	Интернет (Антиплагиат)	0,31%	0,5%
<input checked="" type="checkbox"/>	[40] <a href="#">Жаров В.Е. Сферическ...</a>	<a href="http://iaaras.ru/media/library/zharov_sf.pdf">http://iaaras.ru/media/library/zharov_sf.pdf</a>	Интернет (Антиплагиат)	0%	0,5%
<input checked="" type="checkbox"/>	[41] <a href="#">Сборник трудов второ...</a>	<a href="http://www.iki.rssi.ru/books/2011avanesov.pdf">http://www.iki.rssi.ru/books/2011avanesov.pdf</a>	Интернет (Антиплагиат)	0%	0,49%
<input checked="" type="checkbox"/>	[42] <a href="#">Основы физики плазмы...</a>	<a href="http://elibrary.ru/item.asp?id=15268279">http://elibrary.ru/item.asp?id=15268279</a>	Научные статьи Elibrary	0%	0,49%
<input checked="" type="checkbox"/>	[43] <a href="#">Кеплеровы элементы о...</a>	<a href="http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/448946">http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/448946</a>	Интернет (Антиплагиат)	0,48%	0,48%
<input checked="" type="checkbox"/>	[44] <a href="#">Актуальные проблемы ...</a>	<a href="http://www.bibliorossica.com/book.html?&amp;currBookId=18002">http://www.bibliorossica.com/book.html?&amp;currBookId=18002</a>	Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика	0%	0,48%
<input checked="" type="checkbox"/>	[45] <a href="#">З Т.В. БОРДОВИЦЫНА, ...</a>	<a href="http://diss.seluk.ru/m-mehanika/1010370-3-tv-bordovicina-avd...">http://diss.seluk.ru/m-mehanika/1010370-3-tv-bordovicina-avd...</a>	Интернет (Антиплагиат)	0%	0,48%
<input checked="" type="checkbox"/>	[46] <a href="#">Численное моделирова...</a>	<a href="http://elibrary.ru/item.asp?id=28369943">http://elibrary.ru/item.asp?id=28369943</a>	Научные статьи Elibrary	0,07%	0,47%
<input checked="" type="checkbox"/>	[47] <a href="#">http://plasma2017.co...</a>	<a href="http://plasma2017.cosmos.ru/files-2017/Plasma2017_Abstracts...">http://plasma2017.cosmos.ru/files-2017/Plasma2017_Abstracts...</a>	Интернет (Антиплагиат)	0,47%	0,47%
<input type="checkbox"/>	[48] <a href="#">30 11 Disser Le...</a>	<a href="https://disser.spbu.ru/disser2/disser/30_11_Disser_Letner.pd...">https://disser.spbu.ru/disser2/disser/30_11_Disser_Letner.pd...</a>	Интернет (Антиплагиат)	0	0,37%
<input type="checkbox"/>	[49] <a href="#">Спирякова А.В.</a>		Кольцо вузов	0	0,35%
<input checked="" type="checkbox"/>	[50] <a href="#">Уравнения математиче...</a>	<a href="http://www.bibliorossica.com/book.html?&amp;currBookId=20339">http://www.bibliorossica.com/book.html?&amp;currBookId=20339</a>	Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика	0%	0,34%
<input checked="" type="checkbox"/>	[51] <a href="#">7076_5003_55f9e101.d...</a>		Кольцо вузов	0,33%	0,33%
<input checked="" type="checkbox"/>	[52] <a href="#">59367</a>	<a href="http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=59367">http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=59367</a>	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0,26%	0,31%
<input type="checkbox"/>	[53] <a href="#">ПОЛЯ МАГНИТОСФЕРНЫХ ...</a>	<a href="http://elibrary.ru/item.asp?id=17276567">http://elibrary.ru/item.asp?id=17276567</a>	Научные статьи Elibrary	0	0,3%
<input checked="" type="checkbox"/>	[54] <a href="#">Астрономо-геодезичес...</a>	<a href="http://elibrary.ru/item.asp?id=25303187">http://elibrary.ru/item.asp?id=25303187</a>	Научные статьи Elibrary	0%	0,28%
<input type="checkbox"/>	[55] <a href="#">Министерство образов...</a>		Томский гос. Университет	0	0,27%
<input type="checkbox"/>	[56] <a href="#">275600</a>	<a href="http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&amp;id=275600">http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&amp;id=275600</a>	Университетская библиотека онлайн	0	0,25%
<input checked="" type="checkbox"/>	[57] <a href="#">Геометрия 2. Учебное...</a>	<a href="http://www.bibliorossica.com/book.html?&amp;currBookId=18930">http://www.bibliorossica.com/book.html?&amp;currBookId=18930</a>	Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика	0%	0,24%
<input type="checkbox"/>	[58] <a href="#">О кватернионах и окт...</a>	<a href="http://ibooks.ru/reading.php?short=1&amp;productid=29353">http://ibooks.ru/reading.php?short=1&amp;productid=29353</a>	Модуль поиска ЭБС "Айбукс"	0	0,24%
<input checked="" type="checkbox"/>	[59] <a href="#">ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПУН...</a>	<a href="http://elibrary.ru/item.asp?id=27176514">http://elibrary.ru/item.asp?id=27176514</a>	Научные статьи Elibrary	0,24%	0,24%
<input checked="" type="checkbox"/>				0%	0,24%

<input type="checkbox"/>	[60] <a href="#">Классическая астроно...</a>	<a href="http://www.bibliorossica.com/book.html?&amp;currBookId=15530">http://www.bibliorossica.com/book.html?&amp;currBookId=15530</a>	Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика		
<input checked="" type="checkbox"/>	[61] <a href="#">Астероидно-кометная ...</a>	<a href="http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&amp;id=68834">http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&amp;id=68834</a>	Университетская библиотека онлайн	0%	0,21%
<input checked="" type="checkbox"/>	[62] <a href="#">Астероидно-кометная ...</a>	<a href="http://elibrary.ru/item.asp?id=15250427">http://elibrary.ru/item.asp?id=15250427</a>	Научные статьи Elibrary	0%	0,21%
<input checked="" type="checkbox"/>	[63] <a href="#">2309</a>	<a href="http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=2309">http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=2309</a>	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0%	0,21%
<input checked="" type="checkbox"/>	[64] <a href="#">Неопределенные интег...</a>	<a href="http://www.studentlibrary.ru/doc/ISBN9785703839294-SCN0000.h...">http://www.studentlibrary.ru/doc/ISBN9785703839294-SCN0000.h...</a>	Модуль поиска ЭБС "Консультант студента"	0%	0,21%
<input checked="" type="checkbox"/>	[65] <a href="#">Курс общей физики. М...</a>	<a href="http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&amp;id=69337">http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&amp;id=69337</a>	Университетская библиотека онлайн	0%	0,2%
<input checked="" type="checkbox"/>	[66] <a href="#">Методы проектировани...</a>	<a href="http://www.bibliorossica.com/book.html?&amp;currBookId=11177">http://www.bibliorossica.com/book.html?&amp;currBookId=11177</a>	Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика	0%	0,19%
<input checked="" type="checkbox"/>	[67] <a href="#">208643</a>	<a href="http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&amp;id=208643">http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&amp;id=208643</a>	Университетская библиотека онлайн	0,19%	0,19%
<input checked="" type="checkbox"/>	[68] <a href="#">5808</a>	<a href="http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=5808">http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=5808</a>	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0%	0,18%
<input checked="" type="checkbox"/>	[69] <a href="#">Фундаментальные косм...</a>	<a href="http://www.studentlibrary.ru/doc/ISBN9785922115599-SCN0000.h...">http://www.studentlibrary.ru/doc/ISBN9785922115599-SCN0000.h...</a>	Модуль поиска ЭБС "Консультант студента"	0,02%	0,18%
<input type="checkbox"/>	[70] <a href="#">ГЕОМАГНИТНАЯ СОПРЯЖЕ...</a>	<a href="http://elibrary.ru/item.asp?id=19057007">http://elibrary.ru/item.asp?id=19057007</a>	Научные статьи Elibrary	0	0,15%
<input checked="" type="checkbox"/>	[71] <a href="#">Юрий Ильич Гальперин...</a>	<a href="http://www.iki.rssi.ru/books/2012galperin.pdf">http://www.iki.rssi.ru/books/2012galperin.pdf</a>	Интернет (Антиплагиат)	0,14%	0,14%
<input checked="" type="checkbox"/>	[72] <a href="#">Методика создания и ...</a>		Томский гос. Университет	0,06%	0,14%
<input checked="" type="checkbox"/>	[73] <a href="#">АНАЛИТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ...</a>	<a href="http://elibrary.ru/item.asp?id=11672529">http://elibrary.ru/item.asp?id=11672529</a>	Научные статьи Elibrary	0,14%	0,14%
<input checked="" type="checkbox"/>	[74] <a href="#">Т.ДИСС. Брестер .doc...</a>		Томский гос. Университет	0,1%	0,1%
<input checked="" type="checkbox"/>	[75] <a href="#">ИНТЕГРИРОВАННАЯ НАВИ...</a>	<a href="http://elibrary.ru/item.asp?id=19002032">http://elibrary.ru/item.asp?id=19002032</a>	Научные статьи Elibrary	0,09%	0,09%
<input type="checkbox"/>	[76] <a href="#">59024</a>	<a href="http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=59024">http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=59024</a>	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0	0,09%
<input type="checkbox"/>	[77] <a href="#">Моиссева</a>		Томский гос. Университет	0	0,09%
<input type="checkbox"/>	[78] <a href="#">TPU_VKR_36027.pdf</a>	<a href="http://portal.tpu.ru/cs/TPU190097.pdf">http://portal.tpu.ru/cs/TPU190097.pdf</a>	Кольцо вузов	0	0,07%
<input type="checkbox"/>	[79] <a href="#">TPU_VKR_53881.pdf</a>	<a href="http://portal.tpu.ru/cs/TPU207998.pdf">http://portal.tpu.ru/cs/TPU207998.pdf</a>	Кольцо вузов	0	0,07%
<input checked="" type="checkbox"/>	[80] <a href="#">Модели силы световог...</a>	<a href="http://elibrary.ru/item.asp?id=23573492">http://elibrary.ru/item.asp?id=23573492</a>	Научные статьи Elibrary	0,07%	0,07%

Оригинальные блоки: 87,81%

Заимствованные блоки: 12,19%

Заимствование из "белых" источников: 0%

Итоговая оценка оригинальности: **87,81%**