

УДК 521.3

*М.А. БАНЬЩИКОВА\**, *И.Н. ЧУВАШОВ\**, *А.К. КУЗЬМИН\*\****ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА СОПУТСТВУЮЩЕЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ И АСТРОНОМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА С ПРИБОРОМ АВРОВИЗОР-ВИС/МП НА ПЕРСПЕКТИВНОМ КА МЕТЕОР-МП<sup>1</sup>**

Представлены предварительные результаты, полученные с помощью программного обеспечения «Вектор-М», предназначенного для расчета сопутствующей геофизической и астрономической информации для пространства наблюдений в эксперименте с прибором Авровизор-ВИС/МП на орбите КА Метеор-МП.

*Ключевые слова:* Авровизор-ВИС/МП, Метеор-МП, IGRF NASA, трассирование вдоль геомагнитной линии.

**Введение**

Для получения предварительных результатов расчета сопутствующей геофизической и астрономической информации для пространства наблюдений в перспективном эксперименте с прибором (авроральным имаджером) Авровизор-ВИС/МП на орбите КА Метеор-МП использовался эскизный вариант программного комплекса «Вектор-М» [1]. Программный комплекс «Вектор-М» – это новое программное обеспечение, разрабатываемое в отделе небесной механики и астрометрии НИИ ПММ ТГУ совместно с ИКИ РАН и ЦАО Росгидромет, которое должно прийти на смену программам «Кадр-1, 2, 3, 4» [2, 3], реализованным в 70- и 80-е годы. Данный проект включает в себя решение ряда задач [1] в космических экспериментах магнитосферно-ионосферного направления (в том числе дистанционную оптическую диагностику параметров ионосферы). Некоторые из них – это трассирование вдоль силовых 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 прибора.

Трассирование вдоль линий магнитного поля Земли в программе «Вектор-М» должно обеспечивать решение следующих подзадач:

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, измеряемой в каждом канале, различна). Эта информация позволит решать прямую задачу взаимодействия заряженных частиц с верхней атмосферой и ионосферой, пичт-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 (м.с.л.), 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 томографических реконструкций изображений и получения объемных изображений свечения эмиссий, что в перспективе позволит получать вертикальные распределения потока энергии, средней энергии и ионосферных проводимостей.

<sup>1</sup> Работа выполнена по заданию № 2.4024.2011 Министерства образования и науки Российской Федерации.

- б. 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.

В данной работе мы представляем только первые численные результаты, связанные с вычислением сопутствующей геофизической информации и трассированием вдоль силовой линии магнитного поля Земли. Вычисления основывались на использовании модели магнитного поля Земли (IGRF NASA) [4]. Полученные результаты сравнивались с результатами программы «Кадр-3».

### Модель геомагнитного поля IGRF Model

Модель IGRF (International Geomagnetic Reference Field) [4] – 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 и 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 (рис. 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 град); XLONG – геодезическая долгота (в град); 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 град); 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.

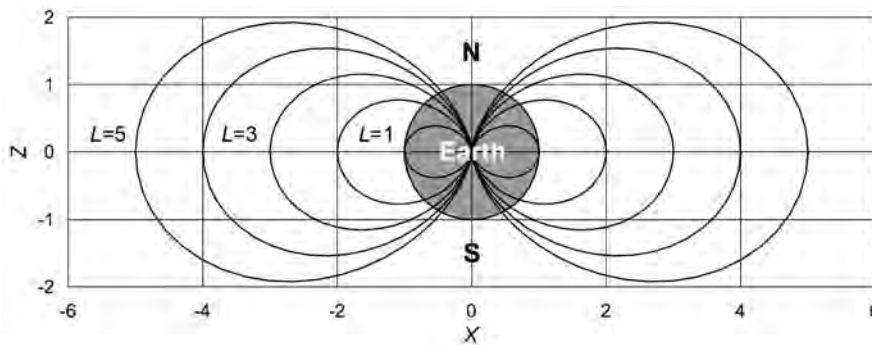


Рис. 1. Замкнутые силовые линии геомагнитного поля

### Трассирование вдоль силовой линии магнитного поля

Трассирование вдоль силовой линии магнитного поля [5] выполнялось путем численного интегрирования системы дифференциальных уравнений

$$\frac{dr}{ds} = \frac{\mathbf{B}}{|\mathbf{B}|} = \mathbf{b}, \tag{1}$$

при условии, что касательная к каждой точке на силовой линии параллельна магнитному полю той же самой точки. В уравнении (1)  $\mathbf{r}$  – вектор положения точки пространства относительно центра Земли;  $s$  – длина дуги вдоль магнитной силовой линии;  $\mathbf{B}$  – вектор магнитного поля относитель-

но экваториальной плоскости Земли;  $\mathbf{b} = \mathbf{B}/|\mathbf{B}|$  – единичный вектор параллельный магнитной силовой линии,

$$\mathbf{B} = \mathbf{R}_y(\varphi)\mathbf{R}_z(-\lambda)(-\text{BDOWN}, \text{BEAST}, \text{BNORTH})^T, \quad (2)$$

где  $\mathbf{R}_y$ ,  $\mathbf{R}_z$  – матрицы поворота относительно соответствующих осей координат, широта  $\varphi$  и долгота  $\lambda$  вычислялись по формулам, представленным ниже, а значения BDOWN, BEAST, BNORTH – по модели геомагнитного поля (IGRF Model, NASA) [4]. В качестве начальных данных было принято  $\mathbf{r}$ , равное положению космического аппарата на орбите в заданный момент времени, и  $s = 0$ . Система уравнений (1) решалась численно методом Рунге – Кутты 4-го порядка с постоянным шагом интегрирования. Для выбора оптимального шага интегрирования был проведен эксперимент, который заключался в следующем: решение системы (1) проводилось от начального положения точки пространства вдоль силовой линии вниз на 300 км, где в конце заданного интервала вычислялась высота полученной точки над поверхностью Земли. На рис. 2 представлен график зависимости ошибки по высоте  $H$  от выбора шага интегрирования, где  $\Delta H_i = |H_i - H_0|$ ,  $i = 1, \dots, n$ . Здесь  $H_0, H_i$  – высоты, вычисленные на конце интервала, причем  $H_0$  получено с минимальным шагом интегрирования равным 0,1 км, а  $H_i$  получены с шагом интегрирования, меняющимся от 0,2 до 300 км,  $n$  – число различных шагов интегрирования соответственно. Как видно из рис. 2, при выборе шага интегрирования от 0,1 до 10 км ошибка  $\Delta H$  варьируется на уровне ошибки округления и составляет порядка  $10^{-11} - 10^{-12}$  км. При решении задачи трассирования вдоль силовой магнитной линии мы выбирали шаг интегрирования, не превышающий значения 1 км, так как при выборе шага больше 1 км можно пропустить заданную высоту, до которой необходимо провести трассирование.

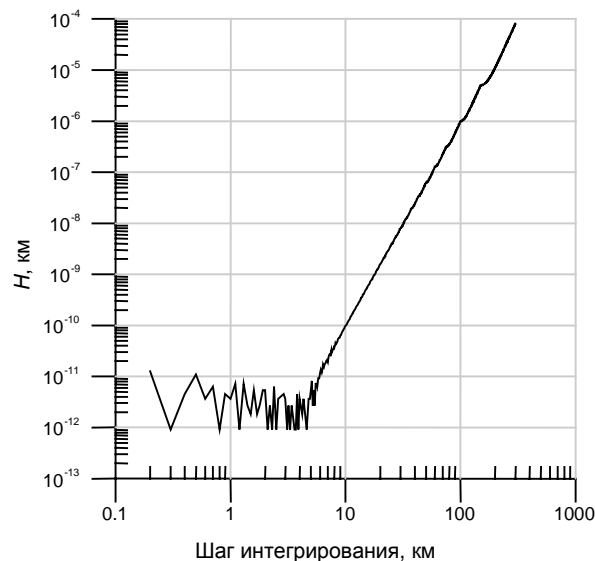


Рис. 2. Зависимость ошибки по высоте  $H$  от выбора шага интегрирования

Высота  $H$  над поверхностью Земли вычислялась следующим образом:

$$\begin{aligned} R &= \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2}, \\ H &= R - R_E \left( 1 - \alpha \frac{x_3^2}{R^2} \right), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\alpha = 1/298,25$  – коэффициент сжатия Земли;  $R_E = 6378,1366$  км – экваториальный радиус Земли;  $(x_1, x_2, x_3)$  – координаты спутника на заданный момент времени, вычисляемые с помощью численной модели движения ИСЗ [6], разработанной в отделе небесной механики и астрометрии НИИ ПММ ТГУ. Для вычисления сопутствующей геофизической информации при использовании модели геомагнитного поля (IGRF) необходимо вычислять географическую долготу  $\lambda$  и широту  $\varphi$  ИСЗ:

$$\lambda = \operatorname{arctg}\left(\frac{x_2}{x_1}\right), \quad 0 \leq \lambda \leq 2\pi,$$

$$\varphi = \operatorname{arcsin}\left(\frac{x_3}{\sqrt{\left[(1-\alpha)^4(x_1^2 + x_2^2) + x_3^2\right]}}\right), \quad -\frac{\pi}{2} \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}. \quad (4)$$

Решение системы уравнений (1) применялось к модельной задаче, где в качестве начальных значений параметров положения объекта выбирались значения, принадлежащие экваториальной плоскости Земли. Высота точки над поверхностью Земли выбиралась равной 0, 12000, 23000 и 40000 км. Затем строилось изменение вектора положения  $\mathbf{r} = (x_1, x_2, x_3)$  относительно центра Земли при равномерном изменении длины дуги вдоль магнитной силовой линии  $s$  при решении системы уравнений (1) (рис. 3).

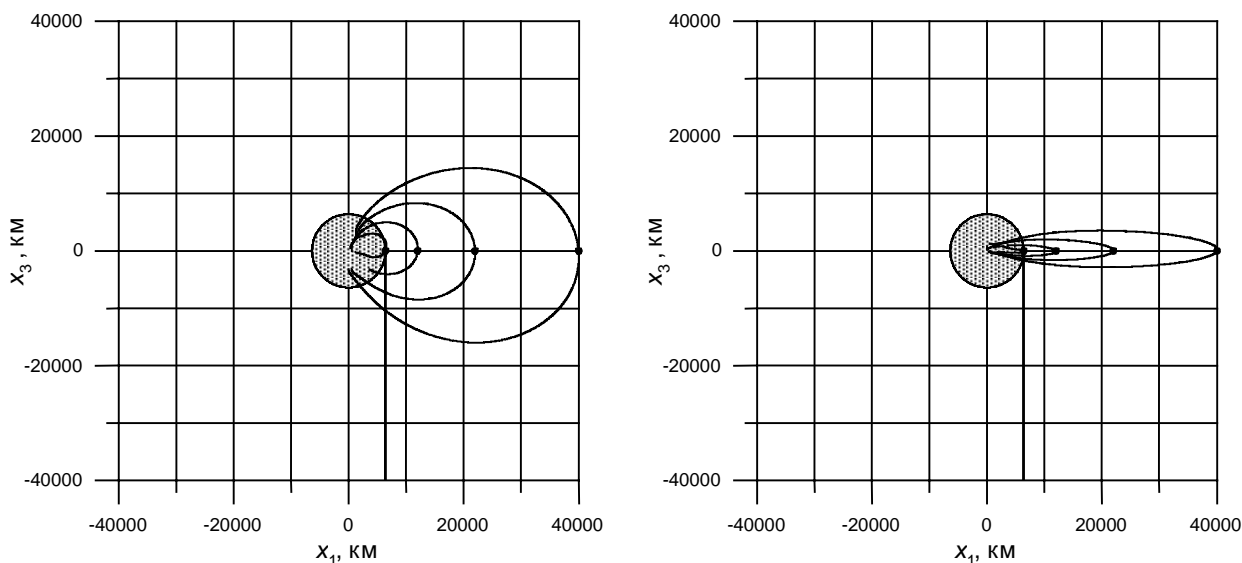


Рис. 3. Изменение вектора положения при трассировании вдоль магнитной силовой линии

На рис. 3 заштрихованной окружностью с центром в начале координат обозначена Земля, а черными кружками на кривых – начальные положения точек пространства. Как видно из графиков, полученные кривые похожи на замкнутые силовые линии геомагнитного поля, как показано на рис. 1. Отсюда можно сделать вывод, что решение системы уравнений (1) верно. Для большей уверенности в правильности решения целесообразно проведение сравнения с реальными данными или другими программами, основанными на модели геомагнитного поля IGRF NASA.

### Численные результаты

Как было сказано ранее, программы «Кадр-1, 2, 3, 4» [1–3] позволяли решать задачи, возникающие при проведении комплексных космических экспериментов магнитосферно-ионосферного направления. Эти версии программы успешно использовались для управления экспериментами в полете и обработки научных данных, полученных в орбитальных околоземных проектах на КА: серии Ореол, ИК-Болгария-1300, ОС Салют-4, ОС Мир и др.

Сравнения программ «Вектор-М» и «Кадр-3» проводились по одним и тем же начальным условиям для расчета орбиты на примере спутника Интеркосмос-Болгария-1300 с круговой орбитой и высотой примерно 830 км. Орбита этого КА была выбрана исходя из близости ее параметров к параметрам орбиты перспективного 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 данные для КА Интеркосмос-Болгария-1300 представлены в табл. 1. Результаты сравнения считались удовлетворительными, если имелись совпадения в угловых параметрах порядка  $1^\circ$ , в векторе по-

ложения спутника – порядка 1 км, в остальных параметрах, связанных с геомагнитным полем, – до первого знака после запятой.

Таблица 1

## Начальные данные для КА Интеркосмос-Болгария-1300

Интеркосмос-Болгария-1300. Высота ~ 830 км		
Начальные данные	I	II
Номер витка	2864	2868
Дата, год, мес., день	82.02.26	82.02.26
Время (мск), ч, мин, с	06.33.267	13.20.594
Баллистич. коэфф. торможен.	0,02	0,02
Большая полуось, м	7229572,5	7229571,6
Эксцентриситет	0,0078756282	0,0078742151
Угол наклонения, 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» представлено в табл. 2, где ALT – геодезическая высота (км); LAT – широта (град); LONG – долгота (град); L – инвариантная координата Мак Илвайна; L0 – инвариантная широта в основании силовой линии;

Таблица 2

## Сравнение вычисленных параметров программ «Кадр-3» и «Вектор-М»

Интеркосмос-Болгария-1300. Высота ~830 км				
Параметр	I		II	
	«Кадр-3»	«Вектор-М»	«Кадр-3»	«Вектор-М»
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

$B_X \text{ MAG} * 10^{-3}$ ,  $B_Y \text{ MAG} * 10^{-3}$ ,  $B_Z \text{ MAG} * 10^{-3}$ ,  $B \text{ MAG} * 10^{-3}$  – северная, восточная и вертикальная составляющая вектора напряженности магнитного поля и его модуль;  $D \text{ MAG}$  – склонение магнитного поля;  $I \text{ MAG}$  – наклонение магнитного поля;  $LD$  – широта магнитного наклонения;  $\text{COSPEQ}$  – косинус экваториального пич-угла;  $\text{INVLAT}$  – инвариантная широта;  $\text{BS ANGLE}$  – угол между  $B$  и единичным вектором направления на Солнце;  $\text{INVRAD}$  – инвариантный радиус;  $X \text{ ABS}$ ,  $Y \text{ ABS}$ ,  $Z \text{ ABS}$  – абсолютные координаты спутника (м);  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  – координаты спутника во вращающейся системе координат (м);  $R$  ( $R_e$ ) – расстояние до спутника в радиусах Земли. Параметры для расчета всех геофизических данных вычислялись по формулам, описанным в [2, 3] с использованием модели геомагнитного поля NASA IGRF MODEL [4]. Координаты спутника  $X \text{ ABS}$ ,  $Y \text{ ABS}$ ,  $Z \text{ ABS}$ ,  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  и  $R$  вычислялись с помощью численной модели движения ИСЗ [5] и внедренной в виде встроенной библиотеки в программу «Вектор-М».

Как видно из результатов, представленных в табл. 2, отличия параметров, полученных двумя программами, незначительны и являются удовлетворительными. Отличия связаны с использованием в «Вектор-М» других моделей численного движения спутника и геомагнитного поля.

Результаты трассирования вдоль силовой линии магнитного поля от КА вниз до высот 250, 150 и 100 км и сравнение некоторых параметров, полученных с помощью программ «Кадр-3» и «Вектор-М», представлены в табл. 3. В качестве начальных параметров было взято положение КА Интеркосмос-Болгария-1300 на витке № 2864 (I) из табл. 1. Как видно из табл. 3, результаты сравнения удовлетворительные. Отличия в долготе и широте составили порядка  $1^\circ$ , а в векторе положения спутника порядка 100–200 км. Несовпадения связаны с различными алгоритмами (в программах «Вектор-М» и «Кадр-3») трассирования вдоль силовой линии магнитного поля.

Таблица 3

#### Результаты трассирования КА Интеркосмос-Болгария-1300 вдоль силовой магнитной линии

	«Вектор-М»	«Кадр-3»	«Вектор-М»	«Кадр-3»	«Вектор-М»	«Кадр-3»
$H$ , км	250		150		100	
LAT, град	-20,34	-19,29	-21,14	-19,91	-21,53	-20,22
LONG, град	66,39	65,02	66,84	65,23	67,07	65,33
$X$ , км	2489,593613	2642,725340	2395,209967	2572,640313	2348,504695	2537,647933
$Y$ , км	5696,358294	5673,012043	5599,852390	5575,096890	5551,670840	5526,315120
$Z$ , км	-2290,178131	-2175,929869	-2340,304637	-2210,043419	-2363,500731	-2225,724641
$R$ , км	6625,065286	6625,838336	6524,753127	6525,678158	6474,770971	6475,620898

#### Заключение

Таким образом, на данном этапе работы по созданию и развитию программы «Вектор-М» были решены задачи, связанные с вычислением сопутствующей геофизической и астрономической информации для пространства наблюдений в перспективном эксперименте с прибором Авровизор-ВИС/МП на орбите КА Метеор-МП, реализован алгоритм трассирования вдоль силовых линий магнитного поля Земли. Результаты сравнения программ «Кадр-3» и «Вектор-М» можно считать удовлетворительными. Отличия полученных параметров, приведенных в табл. 2 и 3, связаны с разными моделями движения КА и геомагнитного поля и различными алгоритмами трассирования вдоль силовой линии магнитного поля, использованными в программах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баньщикова М.А., Чувашов И.Н., Кузьмин А.К. // Изв. вузов. Физика. – 2012. – Т. 55. – № 10/2. – С. 106–111.
2. 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.

3. Гальперин Ю.И., Пономарев Ю.Н., Синицын В.М. Некоторые алгоритмы расчета справочной геофизической информации вдоль орбит околоземных спутников // Препринт ИКИ РАН. – 1980. – 45 с.
4. Model Web Catalogue and Archive [Электронный ресурс]. 2004. URL: <http://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/>
5. Wills D.M., Singh R.J., and Freeman K.S.C. // Ann. Geophys. – 1997. – V. 15. – P. 181–196.
6. Бордовицына Т.В., Авдюшев В.А., Чувашов И.Н. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2009. – Т. 52. – № 12/2. – С. 5–11.

\*Национальный исследовательский

Томский государственный университет, г. Томск, Россия

\*\*Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия

E-mail: astro.tsu@mail.ru

Поступила в редакцию 17.10.13.

*M.A. BANSHCHIKOVA\*, I.N. CHUVASHOV\*, A.K. KUZMIN\*\**

**PRELIMINARY RESULTS OF CALCULATIONS OF GEOPHYSICAL AND ASTRONOMICAL INFORMATION FOR EXPERIMENT WITH DEVICE AVROVIZOR-VIS/MP ON SPACECRAFT METEOR-MP**

*\*Tomsk State University, Tomsk, Russia*

*\*\*IKI, Moscow, Russia*

In the paper are presented preliminary results obtained with the application «Vector-M» designed for calculation of attendant geophysics and astronomical information for observation space in the perspective experiment with the auroral imager Avrovisor-VIS/MP on the orbit of the spacecraft Meteor-MP.

---

Баньщикова Мария Александровна, к.ф.-м.н., НИИ ПММ ТГУ;

Чувашов Иван Николаевич, мл. науч. сотр., НИИ ПММ ТГУ;

Кузьмин Александр Константинович, к.ф.-м.н.