

## ОРБИТЫ И СТРАТЕГИИ ИЗМЕРЕНИЙ ПРОЕКТА РЕЗОНАНС

Ирина Белова<sup>1</sup>, Михаил Могилевский<sup>1</sup>, Татьяна Романцова<sup>1</sup>, Михаил Яновский<sup>1</sup>,  
Александр Шейхет<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт Космических Исследований – Российская академия наук

<sup>2</sup>Научно-производственное объединение им. С. А. Лавочкина  
e-mail: ibelova2004@mail.ru

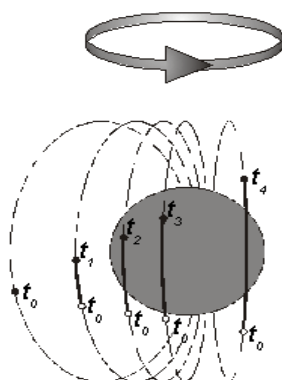
**Ключевые слова:** исследования магнитосферы, орбиты, геомагнитные параметры, моделирование

**Абстракт:** Рассматривается задача о перегруппировке спутников проекта РЕЗОНАНС при переходе от первой фазы исследований (приэкваториальная область) ко второй (Авроральная область). Найдены и проанализированы параметры оптимального перехода.

### Введение

Проект РЕЗОНАНС направлен на исследование процессов во внутренней магнитосфере Земли [1]. Для решения задач проекта предполагается в 2012 году запустить два спутника на специально подобранные орбиты. В настоящее время рассматривается вопрос об использовании 2-ых пар спутников.

**На первой стадии проекта** основное внимание будет уделено изучению резонансных процессов взаимодействия волн и частиц в приэкваториальной области, где такое взаимодействие наиболее эффективно. Для изучения динамики процессов взаимодействия необходимы достаточно длительные измерения в одной силовой трубке, соразмерные по времени с характерными временами нарастания и/или убывания таких процессов. Решением этой задачи является выбор орбит со специально подобранными параметрами, позволяющие находиться внутри заранее выбранной силовой трубки долгое время. Орбиты такого типа названы магнитосинхронными орбитами. Во время движения КА по орбите трубка силовой линии вращается вместе с Землей, как показано на рис. 1.



**Рис. 1**

Здесь  $t_0$  – начальное положение КА в трубке силовой линии,  $t_i$  – положение КА в трубке силовой линии в момент времени  $t_i$ . Жирной линией отмечено расстояние, пройденное КА вдоль выбранной трубки силовой линии. Реальная орбита спутника проходит через точки  $t_i$ , а движение спутника по орбите можно представить, как суперпозицию коротации и движения КА вдоль выбранной силовой трубки. Такая орбита позволяет проводить достаточно длительные измерения внутри одной силовой трубки, что важно для задач проекта РЕЗОНАНС. Для орбиты с периодом 8 часов время нахождения спутников в трубке может достигать 2–2.5 часов, что сравнимо со временем развития процессов в этой трубке ( $L = 4.5$ ). Аппараты будут выведены на орбиты таким образом, чтобы проходить одну и ту

же область силовой трубки с разницей в 4 часа. Кроме того, в то время, когда один аппарат подходит к началу силовой трубки, другой в этот момент должен начинать выход из противоположного конца трубки.

**Во второй фазе** эксперимента основное внимание будет уделяться изучению мелкомасштабных и быстропротекающих явлений в авроральных областей (АО). Для этих исследований необходимо сблизить спутники между собой до расстояния несколько тысяч километров, но при этом их время нахождения в АО должно быть максимально. Для перехода к этой части эксперимента необходимо выполнить орбитальный маневр и коррекцию фазирования КА. Задачей настоящей работы является поиск оптимальной перегруппировки КА, отвечающего задачам эксперимента.

### Методы решения

Период обращения спутников составляет около 8 часов и в первой фазе эксперимента спутники проходят авроральную область в противофазе. Для перехода ко второй фазе эксперимента необходимо добиться сдвига по времени примерно на 4 часа 15 минут. Этого сдвига можно добиться разными способами - например, затормозив только один аппарат на 4 часа, или же ускорив один на 3 часа и затормозив другой на 1 час. Для решения задачи необходимо промоделировать условия, в которые попадают аппараты при разных комбинациях сдвигов и найти оптимальную пару сдвигов.

В качестве критерия оптимальности был выбран критерий, определяемый как расстояние между проекциями аппаратов на ионосферу (магнитным расстоянием между КА).

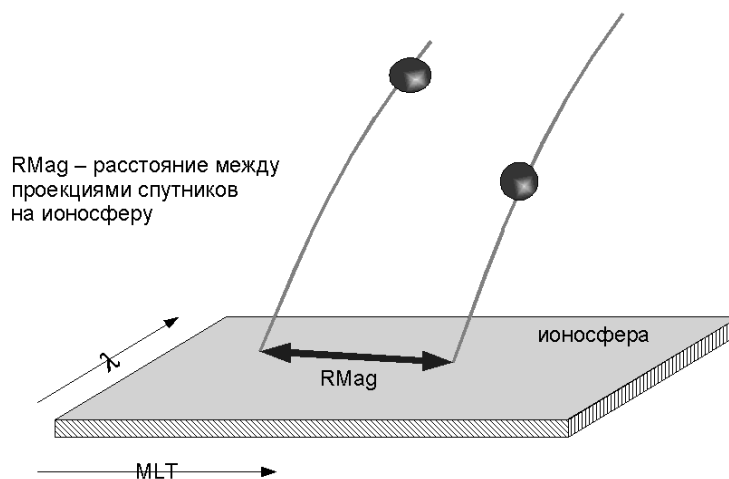


Рис. 2

Геомагнитные параметры, необходимые для решения задачи, были промоделированы с помощью программы CADR-2 [2], а интегрирование уравнений движения проводилось при помощи программы БАЗИС [3].

На каждой орбите была задана опорная точка, а затем были рассчитаны геофизические параметры так, как если бы аппарат проходил эту точку с упреждением или запаздыванием на 15, 30, 45 и так далее минут. Расчетный период составил сутки, то есть около 3 витков.

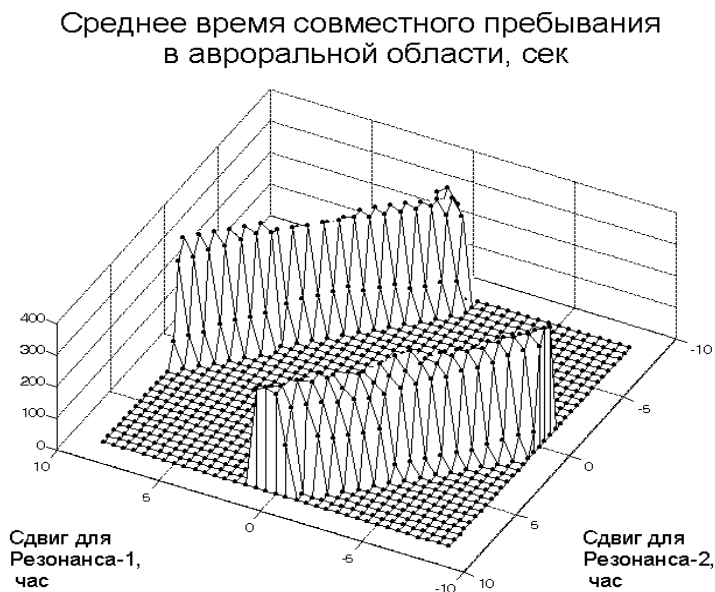
Для каждого аппарата получили 35 наборов геофизических параметров для разных сдвигов прохождения орбиты. В рамках полученной многомерной матрицы параметров рассмотрены все пары взаимных сдвигов и для каждой пары рассчитаны значения контрольных параметров.

В частности, для каждой пары сдвигов оценивалось: возможно ли при такой конфигурации совместное нахождение в АО; если возможно, то какова его длительность на разных витках; как меняются за время совместных пребываний в АО географическое и магнитное расстояния между КА, а также другие физические параметры.

### Результаты расчетов

Результаты расчетов представлены на рисунках 3, 4 и 5. От витка к витку картина получалась неоднородная, поэтому для того, чтобы иметь возможность систематизировать результаты, значения исследуемого параметра усреднялись за весь исследуемый период. Таким образом, на трехмерных графиках, представленных в статье, по горизонтальным осям отложены сдвиги времени прохождения контрольной точки в минутах для каждого аппарата, по вертикальной оси – значение исследуемой величины.

На рис. 3 приведены оценки для среднего времени одновременного пребывания в авроральных областях за одно прохождение. Видно, что наибольшую длительность совместного пребывания в АО дают те пары, где первый аппарат замедляется, а второй ускоряется.

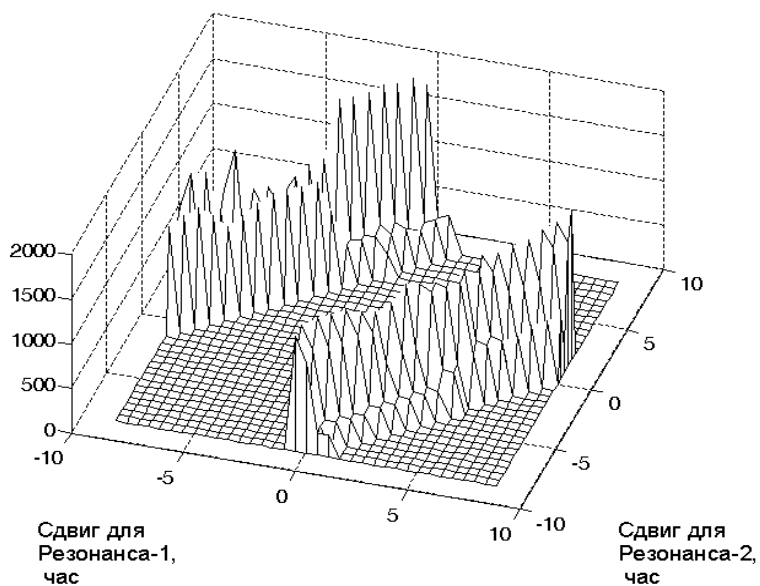


**Рис. 3**

На рис. 4 приведены значения среднего магнитного расстояния только для тех пар, где есть совместное прохождение АО. В черных областях нет интересующих нас пар. Видно, что эти пары неравноценны и существуют и более и менее благоприятные пары сдвигов.

Для точного количественного анализа ситуации этот же график можно представить в виде проекции полученной поверхности на плоскость с проведенными изолиниями.

Среднее магнитное расстояние для совместных  
прохождений авроральной области, км



**Рис. 4**

На рис. 5 приведена проекция на плоскость трехмерного графика, представленного на рис. 4. Светло-серые области соответствуют максимальным значениям; в темных точках находятся интересные нас минимумы.

Среднее магнитное расстояние для совместных  
прохождений авроральной области, км.  
Проекция на плоскость.

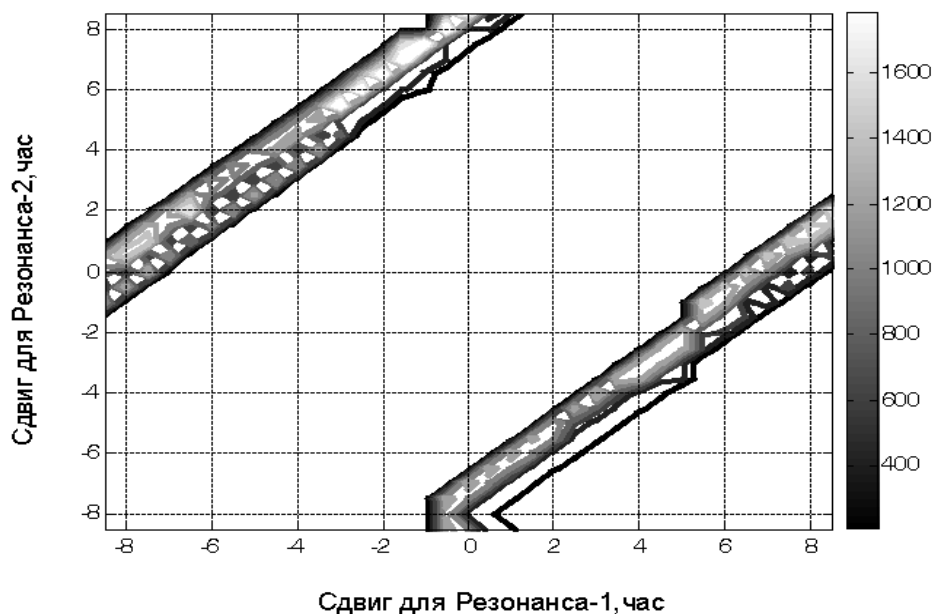


Рис. 5

Есть узкая полоса взаимных сдвигов, дающая хорошие и устойчивые минимальные значения; суммарный сдвиг в этом случае составляет точно 8 часов.

Сдвиги для Резонанса 1 в этих случаях – от -1 до +6 шагов, то есть от -30 мин до +3 часов, и соответствующие им сдвиги Резонанса 2 – от -8 до -2 шагов, т.е от -4 до -1 часов.

Однако на рисунке видны и области с меньшими средними значениями, суммарный сдвиг для которых не равен 8 часам. Сдвиги для Резонанса 1 в этих случаях – от -8 до -3 шагов, то есть от -4 до -1,5 часов, и соответствующие им сдвиги Резонанса 2 – от -1.5 до +4.5 шага, т.е от -40 минут до 2 часов.

Причина этого несоответствия будет предметом последующего анализа.

**Результаты анализа** показывают:

Взаимные сдвиги на 4 часа оптимальны для одновременного прохождения авроральной области;

Предложенная методика может быть применена для моделирования ситуации с использованием более сложной модели магнитного поля.

**Литература:**

- Demekhov A.G., V.Yu. Trakhtengerts, M.M. Mogilevsky et al. Current problems in studies of magnetospheric cyclotron masers and new space project "RESONANCE", Adv. Space Res., Vol. 32, No. 3, pp. 355-374, 2003.
- Гальперин Ю.И., Ю.Н. Пономарев, В.М. Синицин, Программа-справочник КАДР-2, Препринт ИКИ ПР-544, Москва, 1980.
- Марин С.Ф.. К расчету движения высокополюсных ИСЗ в инерциальной геоцентрической системе прямоугольных координат среднего равноденствия и геоэкватора стандартной эпохи J2000, Препринт ИПМ им. Келдыша РАН, № 10, 1994.