

Рис. 3. Структура молекулы дибромотимохинона  
 $C_6O_2Br_2CH_3CH(CH_3)_2$

тральному пластохинону (см. рис. 2). Такой поворот концевой группы, по-видимому, может быть причиной сильного связывания однократно восстановленного хинона и DCMU в месте нахождения  $Q_B$  реакционного центра ФС 2 и ингибиторного действия DCMU. С другой стороны, пластохинон и пластогидрохинон имеют весьма сходную структуру, существенно отличную от структур однократно восстановленного пластохинона и DCMU. Сходство структур объясняет сравнительно легкое связывание и отрыв этих молекул в месте нахождения  $Q_B$ . Из исследования структуры ингибитора электронного транспорта DVMIB (рис. 3) видно, что она существенно отличается от структур хинонов и DCMU в различных состояниях: кольцо углеродов в молекуле DVMIB не плоское. По-видимому, окружение пластохинона в цитохромном  $b_6f$ -комплексе, в котором действует DVMIB, имеет строение, существенно отличное от соответствующего окружения в реакционном центре ФС 2.

## АСТРОНОМИЯ

УДК 521.135

### ОПТИМАЛЬНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ ТРАЕКТОРИИ ПРЯМОГО ПЕРЕЛЕТА В ТОЧКУ ЛИБРАЦИИ $L_3$ В ОГРАНИЧЕННОЙ ПЛОСКОЙ КРУГОВОЙ ЗАДАЧЕ ТРЕХ ТЕЛ В СИСТЕМЕ СОЛНЦЕ–ЗЕМЛЯ

И. А. Субаев\*)

Исследуется ограниченная плоская круговая задача трех тел в системе Солнце–Земля с целью поиска оптимальных двухимпульсных решений для прямого перелета с орбиты ИСЗ высотой 185,2 км в коллинеарную точку либрации  $L_3$ . Найдены два семейства траекторий — «быстрых» и «медленных». Для обоих проведены вычисления модуля базис-вектора Лоудена на предмет возможности подачи третьего импульса для дальнейшей оптимизации.

Исследования космического пространства характеризуются в современную эпоху переходом от отдельных экспериментов к широким программам. Космос стал лабораторией, в которой ведется систематическое изучение физических процессов: как в элементарных частицах, так и в гигантских источниках энергии, какими являются квазары, радиогалактики, взрывы Сверхновых.

Подобные исследования весьма удобно проводить в коллинеарных точках либрации. В частности, в 1978 г. был запущен космический аппарат (КА) ISEE-3 в точку либрации  $L_3$  для исследования Солнца.

## Выводы

1. Методами квантовой химии рассчитаны наиболее вероятные конфигурации и электронные плотности молекул пластохинона в различных состояниях и ингибиторов электронного транспорта DVMIB и DCMU.

2. В однократно восстановленном состоянии пластохинон имеет повернутую концевую группу по сравнению с пластохиноном в нейтральном и дважды восстановленном состояниях. Структура молекулы DCMU наиболее сходна со структурой однократно восстановленного пластохинона, что объясняет прочное связывание этих молекул в центре связывания хинона в реакционном центре ФС 2.

Работа частично поддержана грантом по программе «Университеты России».

## Литература

1. Крамер У., Крофтс Э. // Фотосинтез / Под ред. Говинджи. М.: Мир. 1984. Т. 1. С. 540.
2. Gupta O.A., Bloch D.A., Cherepanov D.A., Mulikidjanian A.Y. // FEBS Lett. 1997. **412**. P. 490.
3. Dewar M.J.S., Thiel W. // J. Am. Chem. Soc. 1977. **99**. P. 4899.
4. Dewar M.J.S., Zoebisch E.G., Healy E.F., Stewart J.J.P. // J. Am. Chem. Soc. 1985. **107**. P. 3902.

Поступила в редакцию  
09.06.99

Для осуществления проекта «Трехмерная плазма и эксперимент с энергичными частицами» НАСА 1 ноября 1994 г. был запущен космический аппарат «WIND»: сначала на очень эксцентричную геоцентрическую орбиту, а затем, после разгона его вблизи Луны, — в точку либрации между Солнцем и Землей —  $L_2$ . КА, долетев до точки либрации, повернул обратно и теперь движется по серии очень эксцентричных орбит вокруг Земли. С целью изучения ранней стадии развития вселенной путем измерения свойств космического микроволнового излучения фона по всей небесной сфере осенью 2000 г. будет запущен спутник «MAP» на лунную вспомо-

\*) Пуштинская радиоастрономическая обсерватория Астрокосмического центра ФИАН.

гательную траекторию в точку либрации  $L_3$  системы Солнце–Земля на срок в 27 месяцев. Для своевременного прогноза космической погоды (в целях защиты астронавтов на орбитальной станции) и выполнения межпланетных космических операций на гало-орбиту вокруг точки либрации  $L_2$  системы Солнце–Земля в 2020 г. НАСА будет запущен космический аппарат SMASS.

В связи с общей тенденцией к удешевлению космических исследований солнечной системы (например, НАСА рассматривает серию проектов стоимостью не выше 100 млн долл.) встает задача более оптимальных с точки зрения энергетических затрат траекторий, использующих свойства самих гравитационных систем (например, маневры у планет для разгона).

В настоящей работе исследовались двухимпульсные траектории перелета с околоземной орбиты ИСЗ в коллинеарную точку либрации  $L_3$  (за Землей на линии Солнце–Земля) и возможность подачи третьего импульса для дальнейшей оптимизации.

Движение КА в системе Солнце–Земля описывается с помощью модели ограниченной плоской круговой задачи трех тел. Уравнения движения КА во вращающейся системе координат  $Oxy$  с началом в барицентре системы Солнце–Земля имеют вид

$$\begin{cases} \frac{d^2 x}{dt^2} - 2 \frac{dy}{dt} = \frac{\partial \Omega}{\partial x}, \\ \frac{d^2 y}{dt^2} + 2 \frac{dx}{dt} = \frac{\partial \Omega}{\partial y}, \end{cases}$$

где

$$\Omega = \frac{(1-\mu)}{r_1} + \frac{\mu}{r_2} + \frac{x^2 + y^2}{2},$$

$$r_1 = \sqrt{(x+\mu)^2 + y^2},$$

$$r_2 = \sqrt{(x-1+\mu)^2 + y^2},$$

$r_1$  и  $r_2$  — расстояние до Солнца и Земли соответственно. Ось  $Ox$  направлена по прямой, соединяющей Солнце и Землю, в сторону Земли. Единицы измерения выбраны так, что сумма масс Солнца и Земли и угловая скорость линии, соединяющей их, равны единицам. За единицу расстояния принято среднее расстояние между Солнцем и Землей — 149,5 млн км. Тогда единица времени равна 1395,1224 ч, а единица скорости 29,7848 км/с. Рассматривается задача определения энергетических затрат для оптимального двухимпульсного перелета КА. Первый импульс (приращение скорости) сообщается аппарату на исходной круговой околоземной орбите, а второй, тормозящий, в точке либрации  $L_3$ .

Путем вариации точки схода с круговой околоземной орбиты определяется оптимальный угол отлета  $\alpha$ , при котором сумма импульса разгона  $\Delta V_1$  и импульса торможения  $\Delta V_2$  в точке либрации минимальна. Следует отметить, что сход КА с круговой орбиты для всех двухимпульсных траекторий попадания в точку либрации происходит по касательной к орбите.

Расчеты показали существование двух семейств траекторий, так называемых «быстрых» и «медленных» (рис. 1), отличающихся формой траекторий и временем перелета КА по ним. При этом для оптимальной «быстрой» траектории (время перелета 885 ч)  $\Delta V_1 = 3,197$  км/с,  $\alpha_f = 40,76^\circ$ ,  $\Delta V_2 = 0,341$  км/с, суммарный импульс  $\Delta V_\Sigma = 3,538$  км/с. Для оптимальной «медленной» траектории (время перелета 2839 ч)  $\Delta V_1 = 3,195$  км/с,  $\alpha_s = 13,25^\circ$ ,  $\Delta V_2 = 0,274$  км/с, суммарный импульс  $\Delta V_\Sigma = 3,469$  км/с.

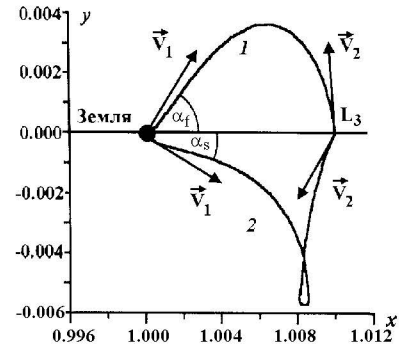


Рис. 1. Оптимальные двухимпульсные траектории перелета в точку либрации  $L_3$  «быстрых» (1) и «медленных» (2) семейств

В то же время в работе [1] суммарный импульс для оптимального перелета на асимптотическую траекторию, входящую в точку либрации, равен 3,266 км/с, а время перелета 334,2 ч. При этом асимптотическая траектория (рис. 2) рассчитывалась на больших расстояниях от точки либрации с использованием численного интегрирования методом Рунге–Кутты–Мерсона.

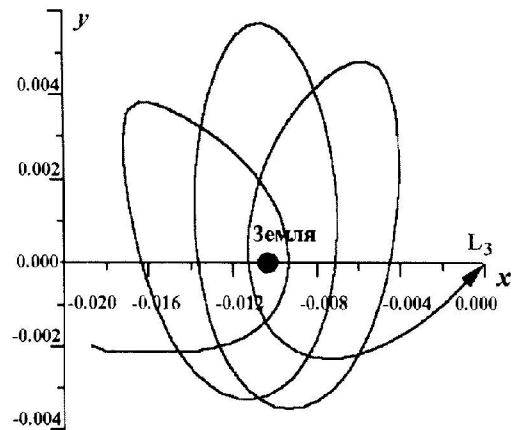


Рис. 2. Асимптотическая траектория, входящая в точку либрации  $L_3$

Аналитический вид асимптотических траекторий в окрестности точки либрации получен методом Ляпунова в работах [2, 3].

Далее с помощью теории базис-векторов Лоудена [4] определялись трехимпульсные решения. При этом «быстрые» траектории с временем перелета меньшим или равным оптимальному являются локально оптимальными (рис. 3, кривая 1) в отличие от траекторий с большим временем перелета. Модуль вектора Лоудена начинает превышать единицу на

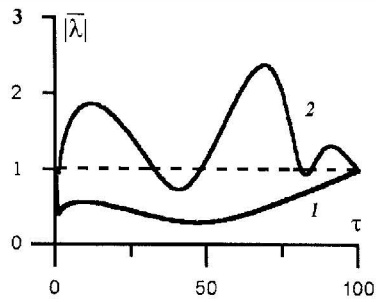


Рис. 3. Поведение модуля базис-вектора Лоудена для траекторий оптимальных двухимпульсных перелетов в точку либрации  $L_3$  «быстрых» (1) и «медленных» (2) семейств

траектории с временем перелета 6500 ч. Для «медленных» траекторий (рис. 3, кривая 2) превышение начинается на траектории с временем перелета меньше времени оптимального перелета (2839 ч).

Дальнейшая оптимизация энергетических затрат путем подачи третьего импульса в момент времени, когда модуль вектора Лоудена на траектории максимально превышает единицу, — цель будущих исследований.

#### Литература

1. Субаев И.А. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1991. № 5. С. 102 (Moscow University Phys. Bull. 1991. No. 5. P. 105).
2. Lukjanov L.G. // Celest. Mech. 1977. 46. P. 489.
3. Лукьянов Л.Г. // Астрон. журн. 1985. 62, № 1. С. 153.
4. Лоуден Д.Ф. Оптимальные траектории для космической навигации. М.: Мир, 1966.

Поступила в редакцию  
19.05.99