



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • [Электронная библиотека](#)

[Препринты ИПМ](#) • [Препринт № 77 за 2016 г.](#)



ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

[Ахметшин Р.З.](#)

Возмущения от Солнца при
многовитковых перелетах на
геостационарную орбиту
космического аппарата с
малой тягой

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Ахметшин Р.З. Возмущения от Солнца при многовитковых перелетах на геостационарную орбиту космического аппарата с малой тягой // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2016. № 77. 32 с. doi:[10.20948/prepr-2016-77](https://doi.org/10.20948/prepr-2016-77)
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2016-77>

**Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Российской академии наук**

Р.З. Ахметшин

**Возмущения от Солнца
при многовитковых перелетах
на геостационарную орбиту
космического аппарата
с малой тягой**

Москва — 2016

Ахметшин Р.З.

Возмущения от Солнца при многовитковых перелетах на геостационарную орбиту космического аппарата с малой тягой

На примере нескольких оптимальных многовитковых траекторий перелета на геостационарную орбиту космического аппарата (КА) с постоянно действующей (без пауз) малой тягой исследуется влияние гравитационного притяжения Солнца. Сравниваются две модели движения КА: в центральном ньютоновом поле Земли и с дополнительным воздействием притяжения Солнца.

Ключевые слова: космический аппарат, малая тяга, многовитковые перелеты, геостационарная орбита, гравитационное возмущение, Солнце

Rauf Zulfarovich Akhmetshin

Influence of the solar gravitation on low-thrust spacecraft multi-orbital transfers to the geostationary orbit

Some trajectories of the multi-orbital transfers to the geostationary orbit are considered; two models of spacecraft motion are compared. One of them represents a flight in the central Newtonian field of the Earth, and the other one includes the additional influence of the solar gravitation.

Key words: spacecraft, low thrust, multi-orbital transfers, geostationary orbit, gravitational perturbation, Sun

Оглавление

Начальные орбиты.....	3
Траектории перелетов в отсутствие возмущений	4
Учет возмущений в уравнениях движения КА	5
Краевые задачи	12
Влияние возмущений на оптимальную траекторию	13
Невязки для «очень длинной» траектории	15
Влияние возмущений на «короткой» траектории.....	18
Влияние возмущений на «средней» траектории.....	20
Влияние возмущений на «длинной» траектории	23
Влияние возмущений на «очень длинной» траектории	26
Влияние возмущений для «легкого» КА	29
Итоговые результаты	32
Литература	32

Начальные орбиты

В работах [1,2] изучались многовитковые перелеты в сфере действия Земли для модели центрального ньютонова поля без учета каких-либо возмущений. В работе [3], на примере нескольких траекторий перелета на геостационарную орбиту (ГСО) продолжительностью от ≈ 2.5 месяцев до года и угловой дальностью от 65 до 281 витка, рассматривалось влияние такого возмущающего фактора, как гравитационное притяжение КА Луной. В данной работе на примере тех же траекторий перелета на ГСО исследуется влияние другого возмущающего фактора – гравитационного притяжения КА Солнцем.

Перелет на геостационарную орбиту с использованием малой тяги представляет собой второй этап комбинированного маневра, в котором задействованы и большая, и малая тяга. На его первом этапе с помощью большой тяги космический аппарат выводится на промежуточную орбиту, с которой затем происходит многовитковая скрутка на ГСО с помощью электроракетных двигателей малой тяги. Промежуточная орбита, которая является начальной для перелета с малой тягой, есть результат компромиссного выбора в пользу большего использования в комбинированном маневре большой тяги, либо малой тяги [4].

Таблица О

Примеры начальных орбит, с которых осуществляется перелет на ГСО с помощью малой тяги

	H_{π} [тыс. км]	H_{α} [тыс. км]	R_{π} [тыс. км]	R_{α} [тыс. км]	e	i [град]	T [сут]	$M_{КА}$ [т]
1	23	55.6	29.371	61.971	0.3569	4	1.124	4.287
2	9.2	76.8	15.571	83.171	0.6846	13	1.264	5.548
3	2.793	78.8	9.164	85.171	0.8057	26	1.180	6.397
4	0.793	79.8	7.164	86.171	0.8465	41	1.161	7.074
5	0.793	68.94	7.164	75.311	0.8263	46.5	0.965	2.325

H_{π} , R_{π} – высота и радиус перигея, H_{α} , R_{α} – высота и радиус апогея, e – эксцентриситет, i – наклонение, T – период, $M_{КА}$ – масса КА.

Варианты такого компромисса приведены в табл. *O*, где даны характеристики начальных (для перелета с малой тягой) орбит. Наиболее выразительный параметр, по которому различаются эти орбиты – наклонение, возрастающее от 4^0 для 1-й орбиты до 46.5^0 для 5-й. Также показателен радиус перигея, уменьшающийся с ≈ 29 тыс. км для 1-й орбиты до ≈ 7 тыс. км для двух последних орбит. Отметим также, что для первых двух орбит радиусы перигея > 15 тыс. км, то есть выше основного радиационного пояса. Наконец, последний вариант выделяется тем, что масса КА заметно меньше, чем в других случаях, а тяговооруженность существенно больше.

Отметим еще, что начальные орбиты имеют большой эксцентриситет. Это связано, в частности, с тем, что при комбинированном маневре необходимо повернуть плоскость орбиты на большой угол, что эффективней осуществлять на большом удалении от Земли, в окрестности апогея.

Траектории перелета в отсутствие возмущений

Характеристики соответствующих оптимальных траекторий перелета с этих орбит приведены в таблице *R* (более подробно – в работе [3]). Эти траектории получены в результате решения двухточечной краевой задачи на минимум затрат рабочего вещества. Предполагается, что тяга работает постоянно (2 ЭРД СПД-140 с удельной тягой 1790 с и суммарной тягой 0.548 Н). В таком случае получаем задачу на минимум времени перелета, т.е. задачу быстрогодействия. На направление тяги не накладывается никаких ограничений, оно выбирается оптимальным на основе принципа максимума. Для определенности в качестве начала траектории перелета принимается перигей начальной орбиты, а долгота восходящего узла Ω_0 и угловое расстояние перицентра от узла ω_0 приняты нулевыми. Используется модель центрального ньютонова поля Земли, которая удобна тем, что результат не зависит от даты старта. Привязка к датам необходима, только когда мы начинаем учитывать вращение Земли – при расчете вариаций геопотенциала, положения Солнца или Луны относительно Земли – при учете их гравитационного влияния, или при определении факта попадания КА в тень Земли. Эти траектории назовем «номинальными», в сравнении с ними будем оценивать влияние различных возмущений. Задача решается в равноденственных переменных в небесной системе координат. В расчетах $t_0 = 0$ соответствует $0^h00^m 01.01.2018$ г.

Напомним, что, как показано в [1], краевая задача может иметь много локальных решений – с разной угловой дальностью, причем тем больше, чем больше витков. Для простоты экстремум ищется в классе траекторий с целым числом витков (витки вычисляются в равноденственной переменной $\varphi = \theta + \omega + \Omega$, θ – истинная аномалия). В этом классе приведенные траектории реализуют глобальный экстремум минимизируемого функционала – затрат рабочего вещества.

Таблица R

Траектории перелета на ГСО в отсутствие возмущений

	1	2	3	4	5
Δi [град]	4	13	26	41	46.5
N [витки]	65	157	232	281	103
T [сут]	69.1	180	269.7	343.9	120.3
$M_{РВ}$ [кг]	186.3	485.3	727.2	927.3	324.2

Δi – изменение наклона, N – количество витков, T – продолжительность перелета, $M_{РВ}$ – затраты рабочего вещества.

Первые четыре траектории по продолжительности перелета можно условно назвать так: 1) «короткая» – 2.3 месяца, 2) «средняя» – 6 месяцев, 3) «длинная» – 9 месяцев, и 4) «очень длинная» – почти год (11.5 месяцев). Последнюю (4 месяца) можно назвать траекторией перелета «легкого» КА.

Учет возмущений в уравнениях движения КА

В работе [3] было кратко, без вывода громоздких формул, описано, как учитывается гравитационное влияние небесного тела в уравнениях оптимального движения КА с малой тягой. Ниже подробно показан вывод этих формул.

Равноденственные переменные $\langle h, \varphi, y, z, v, w \rangle$ (в обозначениях [1,3]) определяются через оскулирующие переменные формулами:

$$h = \sqrt{\mu/p}, \quad y = e \cos(\omega + \Omega), \quad v = \cos \Omega \tan(i/2), \\ \varphi = \theta + \omega + \Omega, \quad z = e \sin(\omega + \Omega), \quad w = \sin \Omega \tan(i/2),$$

где μ – гравитационная постоянная Земли, p – фокальный параметр, e – эксцентриситет, i – наклонение, θ – истинная аномалия, Ω – долгота восходящего узла, ω – угловое расстояние перицентра от узла.

В [1] на основе этих формул и известных уравнений движения КА в оскулирующих переменных (см. например [5]) были получены уравнения движения в равноденственных переменных:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}, \text{ или}$$

$$\begin{aligned} \dot{m} &= -\gamma f, \quad \dot{h} = -\tilde{T}g, \quad \dot{\varphi} = (\mu/r^2 + \tilde{W}gI)/h, \\ \dot{y} &= (\tilde{S} \sin \varphi + \tilde{T} \cos \varphi (g+1) + \tilde{T}gy - \tilde{W}gIz)/h, \\ \dot{z} &= (-\tilde{S} \cos \varphi + \tilde{T} \sin \varphi (g+1) + \tilde{T}gz + \tilde{W}gIy)/h, \\ \dot{v} &= \tilde{W}gQ \cos \varphi/h, \quad \dot{w} = \tilde{W}gQ \sin \varphi/h. \end{aligned}$$

Здесь $\mathbf{x} = \langle m, h, \varphi, y, z, v, w \rangle$ – фазовый вектор, m – масса КА,

$$g = 1/(1 + y \cos \varphi + z \sin \varphi),$$

$$I = v \sin \varphi - w \cos \varphi, \quad Q = (1 + v^2 + w^2) / 2,$$

$$r = \mu g/h^2 - \text{модуль радиус-вектора КА } \mathbf{r},$$

f – величина тяги, γ – константа, а \tilde{S} , \tilde{T} , \tilde{W} – компоненты ускорения \mathbf{a} от всех действующих на КА сил (за исключением нормальной силы притяжения Земли) по радиус-вектору, трансверсали и бинормали.

Случай $\mathbf{a} = \mathbf{a}_{\text{MT}}$ – когда КА движется в центральном ньютоновом поле под действием только малой тяги, был рассмотрен в [1].

В данной работе дополнительно учитывается влияние на движение КА гравитационного притяжения Солнца, т.е. [5]

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}_{\text{MT}} + \mathbf{a}_c, \text{ где } \mathbf{a}_c = \mu_c (-\mathbf{r}_c/r_c^3 + (\mathbf{r}_c - \mathbf{r}) / |\mathbf{r}_c - \mathbf{r}|^3),$$

μ_c – гравитационная постоянная Солнца, а радиус-вектор Солнца \mathbf{r}_c – функция времени, задаваемая эфемеридами DE405.

Компоненты \tilde{S}_c , \tilde{T}_c , \tilde{W}_c вектора \mathbf{a}_c получим из

$$\tilde{S}_c = \mathbf{a}_c \mathbf{e}_r, \quad \tilde{T}_c = \mathbf{a}_c \mathbf{e}_n, \quad \tilde{W}_c = \mathbf{a}_c \mathbf{e}_t,$$

где \mathbf{e}_r , \mathbf{e}_n , \mathbf{e}_t – единичные векторы вдоль радиус-вектора, трансверсали и бинормали.

Поскольку \tilde{S} , \tilde{T} , \tilde{W} входят в правые части уравнений движения линейно, при учете \mathbf{a}_c получаем в \mathbf{f} дополнительные слагаемые. Вводя далее вектор сопряженных переменных $\boldsymbol{\lambda} = \langle \lambda_m, \lambda_h, \lambda_\varphi, \lambda_y, \lambda_z, \lambda_v, \lambda_w \rangle$ и выписывая гамильтониан задачи $\tilde{H} = \boldsymbol{\lambda} \cdot \mathbf{f}$, можем представить его в виде трех слагаемых $\tilde{H} = \tilde{H}_0 + \tilde{H}_{\text{MT}} + \tilde{H}_c$, и тогда уравнения для сопряженных переменных примут вид

$$\dot{\boldsymbol{\lambda}} = -\partial \tilde{H} / \partial \mathbf{x} = -\partial \tilde{H}_0 / \partial \mathbf{x} - \partial \tilde{H}_{\text{MT}} / \partial \mathbf{x} - \partial \tilde{H}_c / \partial \mathbf{x},$$

где \tilde{H}_0 соответствует $\mathbf{a} = \mathbf{0}$, \tilde{H}_{MT} и \tilde{H}_c добавляются при $\mathbf{a} = \mathbf{a}_{\text{MT}} + \mathbf{a}_c$.

Уравнения оптимального движения при $\mathbf{a} = \mathbf{a}_{\text{MT}}$, без \mathbf{a}_c , были получены в [1]. Подробно расписывая производные $\partial \tilde{H}_c / \partial \mathbf{x}$, получим уравнения оптимального движения КА с учетом возмущений от Солнца.

Но прежде необходимо получить выражения для компонентов \tilde{S}_c , \tilde{T}_c , \tilde{W}_c вектора \mathbf{a}_c в равноденственных переменных.

Формулы для ортов \mathbf{e}_r , \mathbf{e}_n , \mathbf{e}_t и вектора $\langle \tilde{S}_c, \tilde{T}_c, \tilde{W}_c \rangle$

Из формул (9.51), (9.52) на стр. 456 в [6] имеем выражения для декартовых компонентов векторов \mathbf{e}_n и \mathbf{e}_r в оскулирующих переменных:

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_{nx} &= \sin i \sin \Omega, & \mathbf{e}_{rx} &= \cos u \cos \Omega - \sin u \sin \Omega \cos i, \\ \mathbf{e}_{ny} &= -\sin i \cos \Omega, & \mathbf{e}_{ry} &= \cos u \sin \Omega + \sin u \cos \Omega \cos i, \\ \mathbf{e}_{nz} &= \cos i; & \mathbf{e}_{rz} &= \sin u \sin i, \quad \text{где } u = \omega + \theta. \end{aligned}$$

А компоненты вектора \mathbf{e}_t получим из векторного произведения $\mathbf{e}_t = \mathbf{e}_n \times \mathbf{e}_r$:

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_{tx} &= \mathbf{e}_{ny} \mathbf{e}_{rz} - \mathbf{e}_{nz} \mathbf{e}_{ry} = \\ &= -\sin i \cos \Omega \sin u \sin i - \cos i (\cos u \sin \Omega + \sin u \cos \Omega \cos i) = \\ &= -\cos \Omega \sin u \sin^2 i - \sin u \cos \Omega \cos^2 i - \cos u \sin \Omega \cos i = \\ &= -\sin u \cos \Omega - \cos u \sin \Omega \cos i; \\ \mathbf{e}_{ty} &= -\mathbf{e}_{nx} \mathbf{e}_{rz} + \mathbf{e}_{nz} \mathbf{e}_{rx} = \\ &= -\sin i \sin \Omega \sin u \sin i + \cos i (\cos u \cos \Omega - \sin u \sin \Omega \cos i) = \\ &= -\sin \Omega \sin u \sin^2 i - \sin u \sin \Omega \cos^2 i + \cos i \cos u \cos \Omega = \\ &= -\sin u \sin \Omega + \cos u \cos \Omega \cos i, \\ \mathbf{e}_{tz} &= \mathbf{e}_{nx} \mathbf{e}_{ry} - \mathbf{e}_{ny} \mathbf{e}_{rx} = \\ &= \sin i \sin \Omega (\cos u \sin \Omega + \sin u \cos \Omega \cos i) + \\ &\quad + \sin i \cos \Omega (\cos u \cos \Omega - \sin u \sin \Omega \cos i) = \\ &= \sin i \cos u \sin^2 \Omega + \sin i \cos u \cos^2 \Omega = \sin i \cos u. \end{aligned}$$

Учитывая, что $v^2 + w^2 = \tan^2(i/2)$ и, следовательно,

$$\begin{aligned} 2 \cos^2(i/2) &= 2 \cos^2(i/2) / (\sin^2(i/2) + \cos^2(i/2)) = 2 / (1 + \tan^2(i/2)) = \\ &= 2 / (1 + v^2 + w^2) = 1/Q, \end{aligned}$$

выведем выражения для компонентов ортов в равноденственных переменных.

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_{nx} &= \sin i \sin \Omega = 2 \sin(i/2) \cos(i/2) \sin \Omega = 2 \tan(i/2) \sin \Omega \cos^2(i/2) = \\ &= 2w \cos^2(i/2) = w/Q; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_{ny} &= -\sin i \cos \Omega = -2 \sin(i/2) \cos(i/2) \cos \Omega = -2 \cos \Omega \tan(i/2) \cos^2(i/2) = \\ &= -2v \cos^2(i/2) = -v/Q; \end{aligned}$$

$$\mathbf{e}_{nz} = \cos i = \cos^2(i/2) - \sin^2(i/2) = 2 \cos^2(i/2) - 1 = 1/Q - 1;$$

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_{rz} &= \sin u \sin i = \sin(\varphi - \Omega) 2 \sin(i/2) \cos(i/2) = \\ &= (\sin \varphi \cos \Omega - \cos \varphi \sin \Omega) \tan(i/2) 2 \cos^2(i/2) = (v \sin \varphi - w \cos \varphi) / Q = I/Q; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_{ry} &= \cos u \sin \Omega + \sin u \cos \Omega \cos i = \cos u \sin \Omega + \sin u \cos \Omega - \sin u \cos \Omega + \\ &+ \sin u \cos \Omega \cos i = \sin(u + \Omega) - \sin u \cos \Omega (1 - \cos i) = \\ &= \sin \varphi - \sin u \cos \Omega (\sin^2(i/2) + \cos^2(i/2) - \cos^2(i/2) + \sin^2(i/2)) = \\ &= \sin \varphi - \sin u \cos \Omega 2 \sin^2(i/2) = \sin \varphi - \sin u \cos \Omega \tan(i/2) 2 \sin(i/2) \cos(i/2) = \\ &= \sin \varphi - v \sin u \sin i = \sin \varphi - v \mathbf{e}_{rz} = \sin \varphi - v I/Q; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_{rx} &= \cos u \cos \Omega - \sin u \sin \Omega \cos i = \cos u \cos \Omega - \sin u \sin \Omega + \sin u \sin \Omega - \\ &- \sin u \sin \Omega \cos i = \cos(u + \Omega) + \sin u \sin \Omega (1 - \cos i) = \cos \varphi + \\ &+ \sin u \sin \Omega 2 \sin^2(i/2) = \cos \varphi + \sin u \sin \Omega \tan(i/2) 2 \sin(i/2) \cos(i/2) = \\ &= \cos \varphi + \sin \Omega \tan(i/2) \sin u \sin i = \cos \varphi + w \mathbf{e}_{rz} = \cos \varphi + w I/Q; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_{tz} &= \sin i \cos u = \sin i \cos(\varphi - \Omega) = \sin i (\cos \varphi \cos \Omega + \sin \varphi \sin \Omega) = \\ &= -\cos \varphi \mathbf{e}_{ny} + \sin \varphi \mathbf{e}_{nx} = \cos \varphi v/Q + \sin \varphi w/Q = (v \cos \varphi + w \sin \varphi)/Q = H/Q; \\ &- \text{здесь обозначено} \quad H = v \cos \varphi + w \sin \varphi. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_{ty} &= -\sin u \sin \Omega + \cos u \cos \Omega \cos i = -\sin u \sin \Omega + \cos u \cos \Omega - \cos u \cos \Omega + \\ &+ \cos u \cos \Omega \cos i = \cos(u + \Omega) - \cos u \cos \Omega (1 - \cos i) = \cos \varphi - \\ &- \cos u \cos \Omega 2 \sin^2(i/2) = \cos \varphi - \cos u \cos \Omega \tan(i/2) 2 \sin(i/2) \cos(i/2) = \\ &= \cos \varphi - \cos \Omega \tan(i/2) \cos u \sin i = \cos \varphi - v \mathbf{e}_{tz} = \cos \varphi - v H/Q; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_{tx} &= -\sin u \cos \Omega - \cos u \sin \Omega \cos i = -\sin u \cos \Omega - \cos u \sin \Omega + \cos u \sin \Omega - \\ &- \cos u \sin \Omega \cos i = -\sin(u + \Omega) + \cos u \sin \Omega (1 - \cos i) = -\sin \varphi + \\ &+ \cos u \sin \Omega 2 \sin^2(i/2) = -\sin \varphi + \cos u \sin \Omega \tan(i/2) 2 \sin(i/2) \cos(i/2) = \\ &= -\sin \varphi + \sin \Omega \tan(i/2) \cos u \sin i = -\sin \varphi + w \mathbf{e}_{tz} = -\sin \varphi + w H/Q. \end{aligned}$$

В результате получаем следующий набор формул, позволяющий вычислить правые части уравнений движения КА с учетом гравитационного воздействия Солнца:

$$\mathbf{e}_{rx} = \cos \varphi + w I/Q, \mathbf{e}_{ry} = \sin \varphi - v I/Q, \mathbf{e}_{rz} = I/Q;$$

$$\mathbf{e}_{nx} = w/Q, \mathbf{e}_{ny} = -v/Q, \mathbf{e}_{nz} = 1/Q - 1;$$

$$\mathbf{e}_{tx} = -\sin \varphi + w H/Q, \mathbf{e}_{ty} = \cos \varphi - v H/Q, \mathbf{e}_{tz} = H/Q;$$

$$\mathbf{r}_x = r \mathbf{e}_{rx}, \mathbf{r}_y = r \mathbf{e}_{ry}, \mathbf{r}_z = r \mathbf{e}_{rz};$$

$$\Delta_x = r_{cx} - r_x, \Delta_y = r_{cy} - r_y, \Delta_z = r_{cz} - r_z, \Delta = (\Delta_x^2 + \Delta_y^2 + \Delta_z^2)^{-2};$$

$$\mathbf{a}_{cx} = \mu_c (-r_{cx} r_c^{-3} + \Delta_{cx} \Delta^{-3}), \mathbf{a}_{cy} = \mu_c (-r_{cy} r_c^{-3} + \Delta_{cy} \Delta^{-3}), \mathbf{a}_{cz} = \mu_c (-r_{cz} r_c^{-3} + \Delta_{cz} \Delta^{-3});$$

$$\tilde{\mathbf{S}}_c = \mathbf{a}_{cx} \mathbf{e}_{rx} + \mathbf{a}_{cy} \mathbf{e}_{ry} + \mathbf{a}_{cz} \mathbf{e}_{rz}, \tilde{\mathbf{T}}_c = \mathbf{a}_{cx} \mathbf{e}_{tx} + \mathbf{a}_{cy} \mathbf{e}_{ty} + \mathbf{a}_{cz} \mathbf{e}_{tz}, \tilde{\mathbf{W}}_c = \mathbf{a}_{cx} \mathbf{e}_{nx} + \mathbf{a}_{cy} \mathbf{e}_{ny} + \mathbf{a}_{cz} \mathbf{e}_{nz}.$$

Чтобы вычислить дополнительные члены в правых частях уравнений для сопряженных переменных, необходимо получить формулы производных.

Производные компонентов $\langle \mathbf{a}_{cx}, \mathbf{a}_{cy}, \mathbf{a}_{cz} \rangle$ вектора \mathbf{a}_c

Введем дополнительно следующие обозначения:

$$F = -y \sin \varphi + z \cos \varphi, J = \lambda_\varphi - z \lambda_y + y \lambda_z, K = \sin \varphi \lambda_y - \cos \varphi \lambda_z,$$

$$L = \cos \varphi \lambda_v + \sin \varphi \lambda_w, M = \sin \varphi \lambda_v - \cos \varphi \lambda_w, k = g (I J + Q L),$$

$$X = y \lambda_y + z \lambda_z - h \lambda_h, Y = \cos \varphi \lambda_y + \sin \varphi \lambda_z, Z = X + Y,$$

$$o = g X + (g+1) Y, O = \lambda_y - g \cos \varphi Z, R = \lambda_z - g \sin \varphi Z,$$

$$T = I \lambda_z - \cos \varphi k, U = I \lambda_y + \sin \varphi k, V = L v + J \sin \varphi, W = L w - J \cos \varphi,$$

Отметим, что $\partial I / \partial \varphi = H, \partial H / \partial \varphi = -I, \partial K / \partial \varphi = Y, \partial Y / \partial \varphi = -K, \partial L / \partial \varphi = -M;$

$$\partial g / \partial \varphi = -g^2 (z \cos \varphi - y \sin \varphi) = -g^2 F; \partial g / \partial y = -g^2 \cos \varphi; \partial g / \partial z = -g^2 \sin \varphi.$$

$$\text{Из } \mathbf{r}_x = r \mathbf{e}_{rx} = \mu g \mathbf{e}_{rx} / h^2 = \mu (1 + y \cos \varphi + z \sin \varphi)^{-1} (\cos \varphi + w I / Q) / h^2$$

$$\text{получим производную } \partial \mathbf{r}_x / \partial \varphi = -r \sin \varphi - g F \mathbf{r}_x + r w \mathbf{H} / Q.$$

Таким же образом получим и другие производные от $\mathbf{r}_x, \mathbf{r}_y, \mathbf{r}_z$.

$$\partial \mathbf{r}_y / \partial \varphi = r \cos \varphi - g F \mathbf{r}_y - r v \mathbf{H} / Q; \partial \mathbf{r}_z / \partial \varphi = -g F \mathbf{r}_z + r \mathbf{H} / Q;$$

$$\partial \mathbf{r}_x / \partial h = -2 \mathbf{r}_x / h; \partial \mathbf{r}_y / \partial h = -2 \mathbf{r}_y / h, \partial \mathbf{r}_z / \partial h = -2 \mathbf{r}_z / h;$$

$$\partial \mathbf{r}_x / \partial y = -g \cos \varphi \mathbf{r}_x, \partial \mathbf{r}_y / \partial y = -g \cos \varphi \mathbf{r}_y, \partial \mathbf{r}_z / \partial y = -g \cos \varphi \mathbf{r}_z;$$

$$\partial \mathbf{r}_x / \partial z = -g \sin \varphi \mathbf{r}_x, \partial \mathbf{r}_y / \partial z = -g \sin \varphi \mathbf{r}_y, \partial \mathbf{r}_z / \partial z = -g \sin \varphi \mathbf{r}_z;$$

$$\partial \mathbf{r}_x / \partial v = w \mathbf{r}_y / Q, \quad \partial \mathbf{r}_y / \partial v = -(r I + v \mathbf{r}_y) / Q, \quad \partial \mathbf{r}_z / \partial v = \mathbf{r}_y / Q;$$

$$\partial \mathbf{r}_x / \partial w = (r I - w \mathbf{r}_x) / Q, \quad \partial \mathbf{r}_y / \partial w = v \mathbf{r}_x / Q, \quad \partial \mathbf{r}_z / \partial w = -\mathbf{r}_x / Q.$$

Далее получим производные от Δ^{-3} и $\mathbf{a}_{cx}, \mathbf{a}_{cy}, \mathbf{a}_{cz}$ по φ :

$$\partial \Delta^{-3} / \partial \varphi = 3 \Delta^{-5} (\Delta_x \partial \mathbf{r}_x / \partial \varphi + \Delta_y \partial \mathbf{r}_y / \partial \varphi + \Delta_z \partial \mathbf{r}_z / \partial \varphi);$$

$$\partial \mathbf{a}_{cx} / \partial \varphi = \mu_c (\Delta_x \partial \Delta^{-3} / \partial \varphi - \Delta^{-3} \partial \mathbf{r}_x / \partial \varphi),$$

$$\partial \mathbf{a}_{cy} / \partial \varphi = \mu_c (\Delta_y \partial \Delta^{-3} / \partial \varphi - \Delta^{-3} \partial \mathbf{r}_y / \partial \varphi),$$

$$\partial \mathbf{a}_{cz} / \partial \varphi = \mu_c (\Delta_z \partial \Delta^{-3} / \partial \varphi - \Delta^{-3} \partial \mathbf{r}_z / \partial \varphi).$$

Аналогичным образом получим производные от Δ^{-3} , a_{cx} , a_{cy} , a_{cz} по переменным h, y, z, v, w .

Часть гамильтониана \tilde{H}_c

$$\begin{aligned} h \tilde{H}_c &= -g h \lambda_h \tilde{T}_c + g I \lambda_\varphi \tilde{W}_c + \tilde{S}_c (\sin \varphi \lambda_y - \cos \varphi \lambda_z) + \tilde{T}_c (g+1) (\cos \varphi \lambda_y + \sin \varphi \lambda_z) + \\ &+ \tilde{T}_c g (y \lambda_y + z \lambda_z) + \tilde{W}_c g I (-z \lambda_y + y \lambda_z) + \tilde{W}_c g Q (\cos \varphi \lambda_v + \sin \varphi \lambda_w) = \\ &= \tilde{S}_c K + \tilde{T}_c (g+1) Y + \tilde{T}_c g (y \lambda_y + z \lambda_z - h \lambda_h) + \tilde{W}_c g I (\lambda_\varphi - z \lambda_y + y \lambda_z) + \tilde{W}_c g Q L = \\ &= \tilde{S}_c K + \tilde{T}_c (g+1) Y + \tilde{T}_c g X + \tilde{W}_c g I J + \tilde{W}_c g Q L = \tilde{S}_c K + \tilde{T}_c o + \tilde{W}_c k. \end{aligned}$$

Нам понадобятся производные от K, o, k :

$$\partial K / \partial \varphi = \cos \varphi \lambda_y + \sin \varphi \lambda_z = Y;$$

$$\partial o / \partial h = g \partial X / \partial h = -g \lambda_h,$$

$$\begin{aligned} \partial o / \partial \varphi &= X \partial g / \partial \varphi + Y \partial g / \partial \varphi + (g+1) \partial Y / \partial \varphi = \\ &= -g^2 F Z + (g+1) (-\sin \varphi \lambda_y + \cos \varphi \lambda_z) = -g^2 F Z - (g+1) K; \end{aligned}$$

$$\partial o / \partial y = (X+Y) \partial g / \partial y + g \partial X / \partial y = -g^2 \cos \varphi Z + g \lambda_y = g O;$$

$$\partial o / \partial z = (X+Y) \partial g / \partial z + g \partial X / \partial z = -g^2 \sin \varphi Z + g \lambda_z = g R;$$

$$\begin{aligned} \partial k / \partial \varphi &= (I J + Q L) \partial g / \partial \varphi + g (J \partial I / \partial \varphi + Q \partial L / \partial \varphi) = -g^2 F (I J + Q L) + \\ &+ g (J H - Q M) = -g F k + g (J H - Q M) = g (J H - Q M - F k); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \partial k / \partial y &= (I J + Q L) \partial g / \partial y + g I \partial J / \partial y = \\ &= -g^2 \cos \varphi (I J + Q L) + g I \lambda_z = g (I \lambda_z - \cos \varphi k) = g T; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \partial k / \partial z &= (I J + Q L) \partial g / \partial z + g I \partial J / \partial z = \\ &= -g^2 \sin \varphi (I J + Q L) - g I \lambda_y = -g (I \lambda_y + \sin \varphi k) = -g U; \end{aligned}$$

$$\partial k / \partial v = g (J \partial I / \partial v + L \partial Q / \partial v) = g (J \sin \varphi + L v) = g V;$$

$$\partial k / \partial w = g (J \partial I / \partial w + L \partial Q / \partial w) = g (-J \cos \varphi + L w) = g W.$$

Рассмотрим $H^* = h Q \tilde{H}_c$. H^* можно представить либо в виде

$$\begin{aligned} H^* &= K [a_{cx} (Q \cos \varphi + w I) + a_{cy} (Q \sin \varphi - v I) + a_{cz} I] + \\ &+ o [a_{cx} (-Q \sin \varphi + w H) + a_{cy} (Q \cos \varphi - v H) + a_{cz} H] + \\ &+ k [a_{cx} w - a_{cy} v + a_{cz} (1 - Q)] \end{aligned}$$

либо в виде

$$\begin{aligned} H^* &= a_{cx} [Q (K \cos \varphi - o \sin \varphi) + w (K I + o H + k)] + \\ &+ a_{cy} [Q (K \sin \varphi + o \cos \varphi) - v (K I + o H + k)] + \\ &+ a_{cz} [-Q k + (K I + o H + k)], \end{aligned}$$

или, обозначая через $\{K\}$, $\{o\}$, $\{k\}$, $\{a_{cx}\}$, $\{a_{cy}\}$, $\{a_{cz}\}$ сомножители при K , o , k , a_{cx} , a_{cy} , a_{cz} , в виде

$$H^* = K\{K\} + o\{o\} + k\{k\} \quad \text{либо} \quad H^* = a_{cx}\{a_{cx}\} + a_{cy}\{a_{cy}\} + a_{cz}\{a_{cz}\}.$$

$$\begin{aligned} \partial H^*/\partial h &= \partial o/\partial h \{o\} + \partial a_{cx}/\partial h \{a_{cx}\} + \partial a_{cy}/\partial h \{a_{cy}\} + \partial a_{cz}/\partial h \{a_{cz}\} = \\ &= -g \lambda_h \{o\} + \partial a_{cx}/\partial h \{a_{cx}\} + \partial a_{cy}/\partial h \{a_{cy}\} + \partial a_{cz}/\partial h \{a_{cz}\}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \partial H^*/\partial \varphi &= \partial a_{cx}/\partial \varphi \{a_{cx}\} + \partial a_{cy}/\partial \varphi \{a_{cy}\} + \partial a_{cz}/\partial \varphi \{a_{cz}\} + \\ &+ \partial K/\partial \varphi \{K\} + \partial o/\partial \varphi \{o\} + \partial k/\partial \varphi \{k\} + \\ &+ K [a_{cx} (-Q \sin \varphi + w \partial I/\partial \varphi) + a_{cy} (Q \cos \varphi - v \partial I/\partial \varphi) + a_{cz} \partial I/\partial \varphi] + \\ &+ o [a_{cx} (-Q \cos \varphi + w \partial H/\partial \varphi) + a_{cy} (-Q \sin \varphi - v \partial H/\partial \varphi) + a_{cz} \partial H/\partial \varphi] = \\ &= \dots + Y\{K\} - (g^2 FZ + (g+1)K)\{o\} + g(JH - QM - Fk)\{k\} + \\ &+ K [a_{cx} (-Q \sin \varphi + wH) + a_{cy} (Q \cos \varphi - vH) + a_{cz} H] + \\ &+ o [a_{cx} (-Q \cos \varphi - wI) + a_{cy} (-Q \sin \varphi + vI) - a_{cz} I] = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \dots + Y\{K\} - (g^2 FZ + (g+1)K)\{o\} + g(JH - QM - Fk)\{k\} + K\{o\} - o\{K\} = \\ &= \dots + (Y - o)\{K\} - (g^2 FZ + (g+1)K - K)\{o\} + g(JH - QM - Fk)\{k\} = \\ &= \{a_{cx}\} \partial a_{cx}/\partial \varphi + \{a_{cy}\} \partial a_{cy}/\partial \varphi + \{a_{cz}\} \partial a_{cz}/\partial \varphi + \\ &+ (Y - o)\{K\} - g(gFZ + K)\{o\} + g(JH - QM - Fk)\{k\}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \partial H^*/\partial y &= \partial a_{cx}/\partial y \{a_{cx}\} + \partial a_{cy}/\partial y \{a_{cy}\} + \partial a_{cz}/\partial y \{a_{cz}\} + \partial o/\partial y \{o\} + \partial k/\partial y \{k\} = \\ &= \partial a_{cx}/\partial y \{a_{cx}\} + \partial a_{cy}/\partial y \{a_{cy}\} + \partial a_{cz}/\partial y \{a_{cz}\} + gO\{o\} + gT\{k\}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \partial H^*/\partial z &= \partial a_{cx}/\partial z \{a_{cx}\} + \partial a_{cy}/\partial z \{a_{cy}\} + \partial a_{cz}/\partial z \{a_{cz}\} + \partial o/\partial z \{o\} + \partial k/\partial z \{k\} = \\ &= \partial a_{cx}/\partial z \{a_{cx}\} + \partial a_{cy}/\partial z \{a_{cy}\} + \partial a_{cz}/\partial z \{a_{cz}\} + gR\{o\} - gU\{k\}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \partial H^*/\partial v &= \partial a_{cx}/\partial v \{a_{cx}\} + \partial a_{cy}/\partial v \{a_{cy}\} + \partial a_{cz}/\partial v \{a_{cz}\} + \partial k/\partial v \{k\} - k[a_{cy} + a_{cz} \partial Q/\partial v] + \\ &+ K [a_{cx} (\cos \varphi \partial Q/\partial v + w \partial I/\partial v) + a_{cy} (\sin \varphi \partial Q/\partial v - I - v \partial I/\partial v) + a_{cz} \partial I/\partial v] + \\ &+ o [a_{cx} (-\sin \varphi \partial Q/\partial v + w \partial H/\partial v) + a_{cy} (\cos \varphi \partial Q/\partial v - H - v \partial H/\partial v) + a_{cz} \partial H/\partial v] = \\ &= \partial a_{cx}/\partial v \{a_{cx}\} + \partial a_{cy}/\partial v \{a_{cy}\} + \partial a_{cz}/\partial v \{a_{cz}\} + gV\{k\} - k[a_{cy} + a_{cz} v] + \\ &+ K [a_{cx} (v \cos \varphi + w \sin \varphi) + a_{cy} (v \sin \varphi - I - v \sin \varphi) + a_{cz} \sin \varphi] + \\ &+ o [a_{cx} (-v \sin \varphi + w \cos \varphi) + a_{cy} (v \cos \varphi - H - v \cos \varphi) + a_{cz} \cos \varphi] = \\ &= \partial a_{cx}/\partial v \{a_{cx}\} + \partial a_{cy}/\partial v \{a_{cy}\} + \partial a_{cz}/\partial v \{a_{cz}\} + gV\{k\} - k[a_{cy} + a_{cz} v] + \\ &+ K [a_{cx} H - a_{cy} I + a_{cz} \sin \varphi] + o [-a_{cx} I - a_{cy} H + a_{cz} \cos \varphi] = \\ &= \partial a_{cx}/\partial v \{a_{cx}\} + \partial a_{cy}/\partial v \{a_{cy}\} + \partial a_{cz}/\partial v \{a_{cz}\} + gV\{k\} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + a_{cx} (KH - o I) - a_{cy} (K I + o H + k) + a_{cz} (K \sin \varphi + o \cos \varphi - k v) ; \\
\partial H^* / \partial w & = \partial a_{cx} / \partial v \{ a_{cx} \} + \partial a_{cy} / \partial v \{ a_{cy} \} + \partial a_{cz} / \partial v \{ a_{cz} \} + \partial k / \partial w \{ k \} + k [a_{cx} - a_{cz} \partial Q / \partial w] + \\
& + K [a_{cx} (\cos \varphi \partial Q / \partial w + I + w \partial I / \partial w) + a_{cy} (\sin \varphi \partial Q / \partial w - v \partial I / \partial w) + a_{cz} \partial I / \partial w] + \\
& + o [a_{cx} (-\sin \varphi \partial Q / \partial w + H + w \partial H / \partial w) + a_{cy} (\cos \varphi \partial Q / \partial w - v \partial H / \partial w) + a_{cz} \partial H / \partial w] = \\
& = \partial a_{cx} / \partial w \{ a_{cx} \} + \partial a_{cy} / \partial w \{ a_{cy} \} + \partial a_{cz} / \partial w \{ a_{cz} \} + gW \{ k \} + k [a_{cx} - a_{cz} w] + \\
& + K [a_{cx} (w \cos \varphi + I - w \cos \varphi) + a_{cy} (w \sin \varphi + v \cos \varphi) - a_{cz} \cos \varphi] + \\
& + o [a_{cx} (-w \sin \varphi + H + w \sin \varphi) + a_{cy} (w \cos \varphi - v \sin \varphi) + a_{cz} \sin \varphi] = \\
& = \partial a_{cx} / \partial w \{ a_{cx} \} + \partial a_{cy} / \partial w \{ a_{cy} \} + \partial a_{cz} / \partial w \{ a_{cz} \} + gW \{ k \} + k [a_{cx} - a_{cz} w] + \\
& + K [a_{cx} I + a_{cy} H - a_{cz} \cos \varphi] + o [a_{cx} H - a_{cy} I + a_{cz} \sin \varphi] = \\
& = \partial a_{cx} / \partial w \{ a_{cx} \} + \partial a_{cy} / \partial w \{ a_{cy} \} + \partial a_{cz} / \partial w \{ a_{cz} \} + gW \{ k \} + \\
& + a_{cx} (K I + o H + k) + a_{cy} (KH - o I) + a_{cz} (-K \cos \varphi + o \sin \varphi - k w) .
\end{aligned}$$

Окончательно получаем производные \tilde{H}_c :

$$\begin{aligned}
\partial \tilde{H}_c / \partial h & = \partial H^* / \partial h / (h Q) - H^* / (h^2 Q) = (\partial H^* / \partial h - H^* / h) / (h Q) ; \\
\partial \tilde{H}_c / \partial \varphi & = \partial H^* / \partial \varphi / (h Q) ; \quad \partial \tilde{H}_c / \partial y = \partial H^* / \partial y / (h Q) ; \quad \partial \tilde{H}_c / \partial z = \partial H^* / \partial z / (h Q) ; \\
\partial \tilde{H}_c / \partial v & = \partial H^* / \partial v / (h Q) - H^* \partial Q / \partial v / (h Q^2) = (\partial H^* / \partial v - v H^* / Q) / (h Q) ; \\
\partial \tilde{H}_c / \partial w & = \partial H^* / \partial w / (h Q) - H^* \partial Q / \partial w / (h Q^2) = (\partial H^* / \partial w - w H^* / Q) / (h Q) .
\end{aligned}$$

Краевая задача

Краевая задача зависит от нескольких параметров. От даты старта, которая влияет на положение Солнца относительно Земли и начальной орбиты. От положения орбиты в пространстве, т.е. от параметров ω_0 и Ω_0 . Параметр ω_0 задан нулевым (из условий комбинированной задачи), а параметр Ω_0 может меняться во всем диапазоне углов от 0^0 до 360^0 – в зависимости от времени старта ракетносителя в течение суток. От времени старта КА с начальной орбиты, т.е. от положения КА на орбите, которое изменяется в диапазоне углов от 0^0 до 360^0 в течение суток с небольшим (периоды орбит 0.965–1.264). Для уменьшения варьируемых параметров принято, что начало траектории перелета с малой тягой – в перигее орбиты.

Еще один параметр, который влияет на решение задачи, – полная угловая дальность перелета, которая зависит от количества N целых витков и угловой дальности $\Phi < 2\pi$ последнего витка. Получить «оптимальные» значения N и Φ в процессе решения краевой задачи проблематично, так как задача имеет много

локальных решений и «результат» будет существенно зависеть от начального приближения. Причем даже при заданном N может быть несколько экстремумов по Φ [1]. С целью упростить решение задачи рассматриваются траектории с $\Phi = 0$. Наилучшее значение N определяется прямым перебором.

На правом конце орбита полностью задана. Поскольку тяга работает постоянно, то задача на минимум расхода массы есть задача быстрогодействия, вследствие чего можно обеспечить перелет на орбиту ГСО, но не в конкретную точку на этой орбите, если все витки целые.

Итак, при принятых упрощениях краевая задача зависит от трех параметров: времени старта t_0 (будем рассматривать диапазон в один год), долготы восходящего узла Ω_0 (из диапазона $0^0 \div 360^0$) и количества витков N . При этом имеем две модели движения: без возмущений и с возмущениями от Солнца. Соответственно, имеем две разные краевые задачи. Первая краевая задача играет двойную роль: 1) ее решения в большинстве случаев используются в качестве начального приближения для решения второй краевой задачи, 2) решения второй – сравниваются с решениями первой.

Влияние возмущений на оптимальную траекторию

Если начальные значения сопряженных переменных, дающих решение первой краевой задачи (без возмущений), использовать для интегрирования оптимальных уравнений движения второй модели (с возмущениями), то полученная траектория не будет удовлетворять краевым условиям. По величине невязок в условиях на правом конце можно, в первом приближении, оценить различие двух моделей и понять, насколько решение первой краевой задачи подходит в качестве начального приближения для решения второй краевой.

Такое сравнение проведено для самой длинной траектории – четвертой. Результаты представлены в таблицах *P4, A4, I4* (стр. 15-17), где даны невязки в конечной орбите по расстояниям в перигее, апогее и по наклонению в зависимости от даты старта (с шагом в \sim полтора месяца) и параметра Ω_0 (с шагом в 10 градусов). Наибольшие по модулю значения в столбцах выделены жирным шрифтом. В некоторых случаях они довольно большие (≈ -4.6 тыс. км по перигею, 5.4 тыс. км – по апогею, $\approx 1.13^0$ по наклонению).

Решая вторую краевую задачу, мы обнулили невязки, но полученная траектория будет отличаться от решения первой краевой. На правом конце две оптимальные траектории будут различаться только продолжительностью пере-

лета, массой КА (или затратами рабочего вещества) и, возможно, количеством витков. Именно такое сравнение проводится далее для всех пяти траекторий.

Влияние возмущений на «короткой» траектории

Результаты расчетов перелетов на ГСО с учетом возмущений от Солнца представлены в таблицах *M1* и *T1* (стр. 18,19). В них даны отличия $\Delta M_{РВ}$ и ΔT в массе рабочего вещества $M_{РВ}$ и продолжительности перелета T от номинальной траектории, как функции даты старта и долготы восходящего узла Ω_0 . Отметим, что в отсутствие возмущений значения $M_{РВ}$ и T не зависят от указанных параметров. И затраты рабочего вещества, и продолжительность перелета могут отличаться как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения. Жирным шрифтом в столбцах выделены максимальные и минимальные значения. Диапазон изменения $\Delta M_{РВ}$: от -1 до 1.6 кг, ΔT : от -0.4 до 0.6 сут. Максимальные отклонения $\Delta M_{РВ}$ и ΔT составляют $\approx 0.84\%$ соответственно от $M_{РВ}$ и T . Оптимальное количество витков не изменилось.

Влияние возмущений на «средней» траектории

Как и в предыдущем случае, результаты расчетов представлены в табл. *M2* и *T2*, и к ним еще добавилась табл. *N2* с информацией о том, как изменяется оптимальное количество витков (стр. 20-22). Так как траектория длиннее, то и отличия в несколько раз больше. Диапазон изменения $\Delta M_{РВ}$: от -4 до 3.7 кг, ΔT : от -1.5 до 1.4 суток, ΔN : от -1 до +2 витков. Однако в процентном соотношении максимальные отклонения $\Delta M_{РВ}$ и ΔT составляют только 0.83 %.

Влияние возмущений на «длинной» траектории

В этом случае диапазон изменения $\Delta M_{РВ}$: от -6.3 до 6.4 кг, ΔT : от -2.3 до 2.4 суток ($\approx 0.87\%$), ΔN : от -2 до +2 витков (табл. *M3*, *T3*, *N3*, стр. 23-25).

Влияние возмущений на «очень длинной» траектории

Естественно, что на самой длинной траектории самые большие диапазоны изменения $\Delta M_{РВ}$, ΔT и ΔN , как в абсолютном: $-9 \div 8.9$ кг, $-3.3 \div 3.3$ суток, $-2 \div 3$ витка, так и в процентном отношении: 1 % (табл. *M4*, *T4*, *N4*, стр. 26-28).

Влияние возмущений для «легкого» КА

За счет меньшей массы КА, чем в других вариантах, на этой траектории наибольший угол поворота плоскости орбиты – 46.5^0 , хотя по другим показателям она занимает промежуточное положение между «короткой» и «средней» траекториями, и в том числе – по изменениям $\Delta M_{РВ}$, ΔT : $-2.2 \div 2.1$ кг, $-0.8 \div 0.8$ суток (0.68%) и ΔN : $0 \div 1$ витка (табл. *M5*, *T5*, *N5*, стр. 29-31).

Невязка в перигее ΔR_{π} для «очень длинной траектории»

t_0 [сут]	0	46	91	137	183	228	274	320
Ω_0 [град]	ΔR_{π} [тыс. км] : -4.6 ÷ 0							
0	-0.5	-0.7	-1.1	-1.4	-0.5	-0.7	-0.9	-1.5
10	-0.3	-0.8	-0.3	-1.3	-0.3	-0.8	-0.3	-1.4
20	-0.2	-0.9	-0.4	-1.1	-0.2	-0.8	-0.5	-1.1
30	-0.3	-0.8	-0.7	-0.5	-0.3	-0.7	-0.7	-0.4
40	-0.8	-0.6	-0.9	-0.0	-0.7	-0.5	-1.0	-0.0
50	-1.0	-0.4	-1.1	-0.2	-1.0	-0.3	-1.1	-0.3
60	-1.1	-0.1	-1.2	-0.5	-1.0	-0.1	-1.2	-0.6
70	-0.9	-0.2	-1.1	-0.8	-0.9	-0.3	-1.1	-0.9
80	-0.5	-1.0	-1.0	-1.1	-0.6	-1.1	-0.9	-1.2
90	-0.4	-1.7	-0.7	-1.3	-0.4	-1.7	-0.7	-1.4
100	-0.5	-2.1	-0.4	-1.4	-0.5	-2.0	-0.4	-1.5
110	-0.8	-2.2	-0.4	-1.4	-0.7	-1.9	-0.5	-1.5
120	-1.1	-2.0	-1.3	-1.3	-1.0	-1.6	-1.5	-1.3
130	-1.3	-1.4	-2.3	-1.0	-1.2	-1.0	-2.4	-1.0
140	-1.5	-0.6	-3.0	-0.6	-1.4	-0.3	-3.0	-0.6
150	-1.5	-0.2	-3.4	-0.2	-1.4	-0.3	-3.3	-0.2
160	-1.4	-0.5	-3.4	-0.9	-1.3	-0.6	-3.2	-1.3
170	-1.1	-0.7	-3.0	-2.1	-1.1	-0.8	-2.7	-2.5
180	-0.8	-0.9	-2.4	-3.1	-0.7	-1.0	-2.0	-3.4
190	-0.3	-1.0	-1.6	-3.7	-0.3	-1.0	-1.1	-4.0
200	-0.3	-1.0	-0.6	-4.0	-0.2	-1.0	-0.2	-4.2
210	-1.7	-0.9	-0.1	-4.0	-1.5	-0.8	-0.1	-4.1
220	-2.9	-0.7	-0.2	-3.7	-2.6	-0.6	-0.3	-3.7
230	-3.8	-0.4	-0.4	-3.1	-3.5	-0.3	-0.4	-3.0
240	-4.4	-0.1	-0.5	-2.3	-4.1	-0.2	-0.5	-2.2
250	-4.6	-1.1	-0.5	-1.5	-4.3	-1.4	-0.5	-1.3
260	-4.4	-2.3	-0.4	-0.6	-4.1	-2.5	-0.4	-0.4
270	-4.0	-3.2	-0.3	-0.1	-3.7	-3.3	-0.2	-0.1
280	-3.2	-3.9	-0.1	-0.3	-3.1	-3.8	-0.2	-0.3
290	-2.4	-4.1	-0.8	-0.4	-2.3	-4.0	-1.1	-0.4
300	-1.5	-4.0	-1.6	-0.4	-1.4	-3.8	-1.9	-0.4
310	-0.7	-3.6	-2.3	-0.4	-0.7	-3.3	-2.6	-0.4
320	-0.6	-2.8	-2.7	-0.4	-0.6	-2.5	-2.9	-0.4
330	-0.7	-1.9	-2.8	-0.5	-0.7	-1.6	-2.9	-0.6
340	-0.7	-0.9	-2.5	-0.8	-0.7	-0.8	-2.5	-1.0
350	-0.7	-0.6	-1.9	-1.1	-0.7	-0.6	-1.8	-1.3

Невязка в апогее ΔR_α для «очень длинной траектории»

t_0 [сут]	0	46	91	137	183	228	274	320
Ω_0 [град]	ΔR_α [тыс. км] : 0.1 ÷ 5.4							
0	1.4	1.8	0.2	0.4	1.3	1.8	0.2	0.4
10	1.0	2.6	0.3	0.4	0.9	2.5	0.5	0.4
20	0.4	3.0	1.4	0.4	0.5	2.8	1.6	0.4
30	0.3	3.1	2.6	0.3	0.3	2.8	2.8	0.2
40	0.4	2.8	3.7	0.4	0.4	2.4	3.8	0.6
50	0.5	2.1	4.4	1.3	0.5	1.7	4.4	1.6
60	0.6	1.2	4.7	2.4	0.6	0.9	4.6	2.8
70	0.6	0.5	4.5	3.4	0.6	0.5	4.3	3.9
80	0.7	0.6	3.9	4.3	0.6	0.6	3.6	4.8
90	1.1	0.7	2.8	4.9	1.0	0.7	2.5	5.3
100	1.9	0.7	1.6	5.1	1.7	0.7	1.2	5.4
110	2.9	0.7	0.5	4.9	2.6	0.6	0.4	5.1
120	3.9	0.6	0.4	4.2	3.5	0.5	0.5	4.2
130	4.6	0.4	0.6	3.2	4.2	0.3	0.6	3.1
140	5.1	0.2	0.7	1.9	4.6	0.2	0.7	1.7
150	5.1	0.6	0.8	0.5	4.7	1.0	0.8	0.2
160	4.7	1.7	0.8	0.2	4.3	2.0	0.7	0.3
170	3.8	2.7	0.7	0.5	3.6	2.9	0.6	0.6
180	2.6	3.5	0.6	0.8	2.5	3.6	0.5	0.9
190	1.2	4.0	0.4	1.0	1.2	3.9	0.3	1.0
200	0.1	4.1	0.2	1.1	0.1	3.8	0.1	1.1
210	0.5	3.7	0.5	1.0	0.5	3.3	0.8	1.1
220	0.8	2.9	1.3	1.0	0.8	2.4	1.6	1.0
230	1.1	1.7	1.9	0.8	1.0	1.3	2.2	0.8
240	1.2	0.5	2.2	0.6	1.1	0.3	2.3	0.6
250	1.2	0.4	2.2	0.4	1.1	0.5	2.1	0.4
260	1.1	0.7	1.8	0.2	1.0	0.7	1.6	0.1
270	0.9	0.8	1.1	0.1	0.8	0.9	0.8	0.3
280	0.7	0.9	0.2	0.6	0.6	0.9	0.1	0.8
290	0.4	0.9	0.1	1.0	0.4	0.9	0.2	1.0
300	0.2	0.8	0.3	1.0	0.2	0.8	0.4	1.0
310	0.2	0.7	0.5	0.8	0.1	0.6	0.5	0.8
320	0.7	0.5	0.6	0.5	0.6	0.4	0.6	0.4
330	1.2	0.3	0.6	0.3	1.1	0.2	0.6	0.2
340	1.5	0.2	0.5	0.2	1.5	0.3	0.5	0.3
350	1.6	0.8	0.4	0.3	1.5	0.9	0.3	0.3

Невязка в наклонении Δi для «очень длинной траектории»

t_0 [сут]	0	46	91	137	183	228	274	320
Ω_0 [град]	Δi [град] : 0.17 ÷ 1.13							
0	0.52	0.28	0.59	0.51	0.51	0.27	0.59	0.52
10	0.49	0.26	0.61	0.53	0.48	0.26	0.61	0.54
20	0.45	0.26	0.60	0.60	0.44	0.27	0.59	0.62
30	0.44	0.27	0.57	0.68	0.44	0.29	0.55	0.70
40	0.50	0.28	0.50	0.76	0.50	0.30	0.49	0.78
50	0.60	0.30	0.43	0.80	0.60	0.32	0.42	0.81
60	0.72	0.33	0.36	0.80	0.72	0.37	0.36	0.81
70	0.83	0.41	0.31	0.77	0.82	0.46	0.32	0.77
80	0.91	0.52	0.29	0.70	0.89	0.57	0.31	0.69
90	0.94	0.64	0.31	0.60	0.93	0.69	0.33	0.59
100	0.92	0.74	0.35	0.51	0.91	0.79	0.38	0.49
110	0.85	0.82	0.41	0.42	0.84	0.85	0.45	0.40
120	0.74	0.86	0.48	0.35	0.73	0.88	0.52	0.34
130	0.60	0.84	0.54	0.31	0.60	0.85	0.58	0.30
140	0.48	0.79	0.57	0.29	0.48	0.78	0.62	0.28
150	0.41	0.68	0.59	0.27	0.41	0.67	0.62	0.26
160	0.43	0.56	0.57	0.25	0.42	0.54	0.59	0.25
170	0.50	0.46	0.52	0.23	0.49	0.46	0.53	0.23
180	0.57	0.47	0.45	0.21	0.55	0.49	0.46	0.22
190	0.60	0.60	0.38	0.19	0.58	0.62	0.39	0.20
200	0.59	0.76	0.37	0.18	0.57	0.78	0.39	0.18
210	0.55	0.91	0.45	0.17	0.53	0.91	0.48	0.17
220	0.48	1.01	0.60	0.18	0.48	1.00	0.64	0.19
230	0.41	1.05	0.76	0.23	0.41	1.03	0.81	0.24
240	0.34	1.02	0.92	0.31	0.35	0.99	0.97	0.32
250	0.28	0.94	1.03	0.41	0.29	0.90	1.08	0.43
260	0.24	0.82	1.10	0.53	0.26	0.78	1.13	0.55
270	0.21	0.68	1.10	0.64	0.23	0.65	1.13	0.67
280	0.20	0.55	1.05	0.74	0.23	0.53	1.06	0.78
290	0.22	0.45	0.95	0.82	0.24	0.43	0.95	0.85
300	0.26	0.39	0.82	0.86	0.28	0.37	0.81	0.89
310	0.31	0.36	0.68	0.86	0.33	0.35	0.67	0.89
320	0.38	0.37	0.56	0.82	0.39	0.34	0.55	0.84
330	0.45	0.36	0.50	0.75	0.45	0.34	0.50	0.76
340	0.50	0.34	0.50	0.65	0.50	0.32	0.51	0.66
350	0.52	0.31	0.54	0.56	0.52	0.29	0.55	0.56

Изменение массы рабочего вещества $\Delta M_{РВ}$ («короткая» траектория)

t_0 [сут]	0	46	91	137	183	228	274	320
Ω_0 [град]	$\Delta M_{РВ}$ [кг] : -1.0 ÷ 1.6 (0.84%)							
0	0.5	0.3	-0.4	-0.3	0.4	0.3	-0.4	-0.3
10	0.4	0.6	-0.2	-0.4	0.4	0.6	-0.2	-0.4
20	0.3	0.9	0.1	-0.4	0.2	0.9	0.1	-0.4
30	0.1	1.0	0.4	-0.4	0.1	1.0	0.5	-0.4
40	-0.1	1.0	0.7	-0.3	-0.1	1.0	0.8	-0.3
50	-0.3	0.9	1.1	-0.1	-0.3	0.9	1.2	-0.1
60	-0.4	0.7	1.3	0.1	-0.4	0.7	1.4	0.2
70	-0.5	0.4	1.4	0.4	-0.4	0.4	1.5	0.5
80	-0.4	0.1	1.4	0.7	-0.4	0.1	1.4	0.8
90	-0.4	-0.2	1.2	1.0	-0.3	-0.2	1.2	1.2
100	-0.2	-0.5	0.9	1.3	-0.1	-0.5	0.9	1.4
110	0.1	-0.7	0.5	1.4	0.1	-0.7	0.5	1.6
120	0.4	-0.7	0.2	1.4	0.4	-0.7	0.1	1.6
130	0.7	-0.8	-0.2	1.3	0.7	-0.8	-0.3	1.4
140	1.0	-0.7	-0.5	1.1	0.9	-0.7	-0.6	1.1
150	1.2	-0.5	-0.7	0.7	1.2	-0.5	-0.8	0.8
160	1.4	-0.3	-0.9	0.4	1.3	-0.3	-0.9	0.4
170	1.4	0.0	-1.0	0.0	1.3	0.0	-1.0	-0.0
180	1.2	0.3	-0.9	-0.3	1.1	0.3	-0.9	-0.4
190	1.0	0.6	-0.8	-0.6	0.9	0.6	-0.8	-0.7
200	0.6	0.8	-0.6	-0.8	0.5	0.8	-0.6	-0.9
210	0.2	1.0	-0.4	-0.9	0.2	1.0	-0.3	-1.0
220	-0.1	0.9	-0.2	-1.0	-0.2	0.9	-0.1	-1.0
230	-0.5	0.8	0.1	-1.0	-0.5	0.8	0.2	-1.0
240	-0.7	0.6	0.3	-0.8	-0.7	0.6	0.4	-0.9
250	-0.9	0.3	0.4	-0.7	-0.9	0.3	0.5	-0.7
260	-1.0	-0.1	0.5	-0.5	-1.0	-0.1	0.5	-0.5
270	-1.0	-0.4	0.4	-0.3	-1.0	-0.4	0.4	-0.3
280	-1.0	-0.6	0.3	-0.1	-0.9	-0.6	0.3	-0.0
290	-0.8	-0.8	0.1	0.1	-0.8	-0.8	0.1	0.1
300	-0.6	-0.9	-0.1	0.2	-0.6	-0.9	-0.2	0.2
310	-0.4	-0.9	-0.3	0.3	-0.3	-0.9	-0.4	0.3
320	-0.1	-0.8	-0.5	0.2	-0.1	-0.8	-0.5	0.2
330	0.2	-0.6	-0.6	0.1	0.2	-0.6	-0.6	0.1
340	0.4	-0.3	-0.6	0.0	0.3	-0.3	-0.6	-0.0
350	0.5	-0.0	-0.6	-0.1	0.4	-0.0	-0.6	-0.2

Изменение продолжительности перелета ΔT («короткая» траектория)

t_0 [сут]	0	46	91	137	183	228	274	320
Ω_0 [град]		ΔT [сутки] : -0.4 ÷ 0.6 (0.84%)						
0	0.2	0.1	-0.2	-0.1	0.2	0.1	-0.1	-0.1
10	0.2	0.2	-0.1	-0.1	0.1	0.2	-0.1	-0.1
20	0.1	0.3	0.0	-0.1	0.1	0.3	0.1	-0.2
30	0.0	0.4	0.2	-0.1	0.0	0.4	0.2	-0.1
40	-0.0	0.4	0.3	-0.1	-0.0	0.4	0.3	-0.1
50	-0.1	0.3	0.4	-0.0	-0.1	0.3	0.4	-0.0
60	-0.1	0.3	0.5	0.1	-0.1	0.3	0.5	0.1
70	-0.2	0.1	0.5	0.2	-0.2	0.1	0.5	0.2
80	-0.2	0.0	0.5	0.3	-0.2	0.0	0.5	0.3
90	-0.1	-0.1	0.4	0.4	-0.1	-0.1	0.4	0.4
100	-0.1	-0.2	0.3	0.5	-0.1	-0.2	0.3	0.5
110	0.0	-0.2	0.2	0.5	0.0	-0.2	0.2	0.6
120	0.1	-0.3	0.1	0.5	0.1	-0.3	0.0	0.6
130	0.3	-0.3	-0.1	0.5	0.2	-0.3	-0.1	0.5
140	0.4	-0.2	-0.2	0.4	0.3	-0.2	-0.2	0.4
150	0.5	-0.2	-0.3	0.3	0.4	-0.2	-0.3	0.3
160	0.5	-0.1	-0.3	0.1	0.5	-0.1	-0.3	0.1
170	0.5	0.0	-0.4	0.0	0.5	0.0	-0.4	-0.0
180	0.5	0.1	-0.3	-0.1	0.4	0.1	-0.3	-0.1
190	0.4	0.2	-0.3	-0.2	0.3	0.2	-0.3	-0.3
200	0.2	0.3	-0.2	-0.3	0.2	0.3	-0.2	-0.3
210	0.1	0.4	-0.2	-0.3	0.1	0.4	-0.1	-0.4
220	-0.1	0.4	-0.1	-0.4	-0.1	0.4	-0.0	-0.4
230	-0.2	0.3	0.0	-0.4	-0.2	0.3	0.1	-0.4
240	-0.3	0.2	0.1	-0.3	-0.3	0.2	0.1	-0.3
250	-0.3	0.1	0.2	-0.3	-0.3	0.1	0.2	-0.3
260	-0.4	-0.0	0.2	-0.2	-0.4	-0.0	0.2	-0.2
270	-0.4	-0.1	0.2	-0.1	-0.4	-0.1	0.2	-0.1
280	-0.4	-0.2	0.1	-0.0	-0.3	-0.2	0.1	-0.0
290	-0.3	-0.3	0.0	0.0	-0.3	-0.3	0.0	0.1
300	-0.2	-0.3	-0.0	0.1	-0.2	-0.3	-0.1	0.1
310	-0.1	-0.3	-0.1	0.1	-0.1	-0.3	-0.1	0.1
320	-0.0	-0.3	-0.2	0.1	-0.0	-0.3	-0.2	0.1
330	0.1	-0.2	-0.2	0.1	0.1	-0.2	-0.2	0.0
340	0.1	-0.1	-0.2	0.0	0.1	-0.1	-0.2	-0.0
350	0.2	-0.0	-0.2	-0.1	0.2	-0.0	-0.2	-0.1

Изменение массы рабочего вещества $\Delta M_{РВ}$ («средняя» траектория)

t_0 [сут]	0	46	91	137	183	228	274	320
Ω_0 [град]	$\Delta M_{РВ}$ [кг] : -4.0 ÷ 3.7 (0.83%)							
0	1.6	-0.9	-1.6	0.9	1.6	-0.7	-1.6	0.8
10	2.3	0.3	-1.4	0.6	2.2	0.4	-1.3	0.6
20	2.6	1.4	-0.9	0.3	2.5	1.5	-0.7	0.3
30	2.7	2.4	-0.2	0.1	2.6	2.5	0.0	0.1
40	2.4	3.2	0.6	-0.1	2.4	3.2	0.9	-0.1
50	2.0	3.6	1.4	-0.2	1.9	3.6	1.7	-0.1
60	1.3	3.7	2.2	-0.1	1.3	3.6	2.5	0.0
70	0.7	3.5	2.9	0.1	0.7	3.3	3.1	0.3
80	-0.0	2.9	3.3	0.5	0.0	2.7	3.5	0.7
90	-0.5	2.1	3.6	0.9	-0.5	1.9	3.6	1.2
100	-0.9	1.2	3.5	1.5	-0.8	1.0	3.4	1.7
110	-0.9	0.1	3.1	2.0	-0.9	0.0	3.0	2.2
120	-0.8	-0.8	2.5	2.4	-0.7	-0.8	2.3	2.6
130	-0.3	-1.5	1.7	2.7	-0.4	-1.5	1.4	2.8
140	0.2	-2.0	0.8	2.8	0.2	-1.9	0.5	2.8
150	0.9	-2.2	-0.2	2.6	0.8	-2.0	-0.4	2.6
160	1.5	-2.1	-1.1	2.3	1.4	-1.8	-1.3	2.2
170	2.1	-1.7	-1.9	1.7	2.0	-1.4	-1.9	1.6
180	2.4	-1.0	-2.4	1.0	2.3	-0.7	-2.4	0.8
190	2.5	-0.3	-2.7	0.1	2.4	-0.0	-2.6	-0.1
200	2.3	0.5	-2.7	-0.8	2.2	0.7	-2.5	-1.0
210	1.8	1.1	-2.4	-1.6	1.8	1.3	-2.2	-1.8
220	1.1	1.6	-2.0	-2.4	1.1	1.6	-1.8	-2.5
230	0.2	1.8	-1.4	-2.9	0.2	1.7	-1.2	-3.0
240	-0.9	1.7	-0.8	-3.2	-0.8	1.5	-0.7	-3.3
250	-1.9	1.3	-0.3	-3.3	-1.8	1.1	-0.1	-3.3
260	-2.8	0.7	0.2	-3.1	-2.7	0.4	0.2	-3.1
270	-3.5	-0.2	0.5	-2.7	-3.4	-0.5	0.5	-2.7
280	-4.0	-1.1	0.6	-2.1	-3.8	-1.4	0.5	-2.1
290	-4.0	-2.0	0.5	-1.5	-3.9	-2.2	0.3	-1.5
300	-3.8	-2.7	0.2	-0.8	-3.6	-2.9	-0.0	-0.8
310	-3.2	-3.2	-0.2	-0.1	-3.1	-3.3	-0.5	-0.2
320	-2.3	-3.4	-0.7	0.4	-2.2	-3.4	-0.9	0.3
330	-1.3	-3.2	-1.1	0.8	-1.3	-3.2	-1.3	0.7
340	-0.2	-2.7	-1.5	0.9	-0.2	-2.6	-1.6	0.9
350	0.8	-1.9	-1.7	1.0	0.8	-1.7	-1.7	0.9

Изменение продолжительности перелета ΔT («средняя» траектория)

t_0 [сут]	0	46	91	137	183	228	274	320
Ω_0 [град]	ΔT [сутки] : -1.5 ÷ 1.4 (0.83%)							
0	0.6	-0.3	-0.6	0.3	0.6	-0.3	-0.6	0.3
10	0.8	0.1	-0.5	0.2	0.8	0.2	-0.5	0.2
20	1.0	0.5	-0.3	0.1	0.9	0.6	-0.3	0.1
30	1.0	0.9	-0.1	0.0	1.0	0.9	0.0	0.0
40	0.9	1.2	0.2	-0.0	0.9	1.2	0.3	-0.0
50	0.7	1.4	0.5	-0.1	0.7	1.3	0.6	-0.0
60	0.5	1.4	0.8	-0.1	0.5	1.3	0.9	0.0
70	0.2	1.3	1.1	0.0	0.2	1.2	1.1	0.1
80	-0.0	1.1	1.2	0.2	0.0	1.0	1.3	0.3
90	-0.2	0.8	1.3	0.3	-0.2	0.7	1.3	0.4
100	-0.3	0.4	1.3	0.5	-0.3	0.4	1.3	0.6
110	-0.3	0.1	1.2	0.7	-0.3	0.0	1.1	0.8
120	-0.3	-0.3	0.9	0.9	-0.3	-0.3	0.8	0.9
130	-0.1	-0.6	0.6	1.0	-0.1	-0.6	0.5	1.0
140	0.1	-0.8	0.3	1.0	0.1	-0.7	0.2	1.0
150	0.3	-0.8	-0.1	1.0	0.3	-0.7	-0.2	1.0
160	0.6	-0.8	-0.4	0.8	0.5	-0.7	-0.5	0.8
170	0.8	-0.6	-0.7	0.6	0.7	-0.5	-0.7	0.6
180	0.9	-0.4	-0.9	0.4	0.9	-0.3	-0.9	0.3
190	0.9	-0.1	-1.0	0.0	0.9	-0.0	-1.0	-0.0
200	0.9	0.2	-1.0	-0.3	0.8	0.3	-0.9	-0.4
210	0.7	0.4	-0.9	-0.6	0.7	0.5	-0.8	-0.7
220	0.4	0.6	-0.7	-0.9	0.4	0.6	-0.7	-0.9
230	0.1	0.7	-0.5	-1.1	0.1	0.6	-0.5	-1.1
240	-0.3	0.6	-0.3	-1.2	-0.3	0.6	-0.2	-1.2
250	-0.7	0.5	-0.1	-1.2	-0.7	0.4	-0.1	-1.2
260	-1.0	0.2	0.1	-1.2	-1.0	0.1	0.1	-1.2
270	-1.3	-0.1	0.2	-1.0	-1.3	-0.2	0.2	-1.0
280	-1.5	-0.4	0.2	-0.8	-1.4	-0.5	0.2	-0.8
290	-1.5	-0.7	0.2	-0.5	-1.4	-0.8	0.1	-0.5
300	-1.4	-1.0	0.1	-0.3	-1.3	-1.1	-0.0	-0.3
310	-1.2	-1.2	-0.1	-0.1	-1.1	-1.2	-0.2	-0.1
320	-0.8	-1.3	-0.2	0.1	-0.8	-1.3	-0.3	0.1
330	-0.5	-1.2	-0.4	0.3	-0.5	-1.2	-0.5	0.2
340	-0.1	-1.0	-0.5	0.4	-0.1	-1.0	-0.6	0.3
350	0.3	-0.7	-0.6	0.4	0.3	-0.6	-0.6	0.3

Изменение оптимального числа витков ΔN («средняя» траектория)

t_0 [сут]	0	46	91	137	183	228	274	320
Ω_0 [град]	$\Delta N : -1 \div 2$							
0	+1	—	—	+1	+1	—	—	+1
10	+1	—	—	+1	+1	—	—	+1
20	+1	+1	—	—	+1	+1	—	—
30	+1	+1	—	—	+1	+1	—	—
40	+1	+1	—	—	+1	+1	+1	—
50	+1	+2	+1	—	+1	+2	+1	—
60	+1	+2	+1	—	+1	+2	+1	—
70	+1	+2	+1	—	+1	+2	+1	—
80	—	+1	+1	—	—	+1	+2	+1
90	—	+1	+2	+1	—	+1	+2	+1
100	—	+1	+2	+1	—	+1	+2	+1
110	—	—	+1	+1	—	—	+1	+1
120	—	—	+1	+1	—	—	+1	+1
130	—	—	+1	+1	—	—	+1	+1
140	—	—	+1	+1	—	—	+1	+1
150	+1	—	—	+1	+1	—	—	+1
160	+1	—	—	+1	+1	—	—	+1
170	+1	—	—	+1	+1	—	—	+1
180	+1	—	-1	+1	+1	—	-1	+1
190	+1	—	-1	—	+1	—	-1	—
200	+1	—	-1	—	+1	+1	-1	—
210	+1	+1	-1	—	+1	+1	—	—
220	+1	+1	—	—	+1	+1	—	-1
230	—	+1	—	-1	—	+1	—	-1
240	—	+1	—	-1	—	+1	—	-1
250	—	+1	—	-1	—	+1	—	-1
260	-1	+1	—	-1	-1	+1	—	-1
270	-1	—	+1	-1	-1	—	—	-1
280	-1	—	+1	—	-1	—	+1	—
290	-1	—	+1	—	-1	—	—	—
300	-1	-1	—	—	-1	-1	—	—
310	-1	-1	—	—	-1	-1	—	—
320	—	-1	—	—	—	-1	—	—
330	—	-1	—	+1	—	-1	—	+1
340	—	-1	—	+1	—	-1	—	+1
350	-1	—	—	+1	-1	—	—	+1

Изменение массы рабочего вещества $\Delta M_{РВ}$ («длинная» траектория)

t_0 [сут]	0	46	91	137	183	228	274	320
Ω_0 [град]	$\Delta M_{РВ}$ [кг] : -6.3 ÷ 6.4 (0.87%)							
0	1.7	-0.5	-1.6	0.5	1.6	-0.3	-1.6	0.4
10	2.7	1.2	-0.7	0.7	2.7	1.4	-0.6	0.6
20	3.4	2.9	0.4	0.9	3.3	3.1	0.6	0.8
30	3.7	4.3	1.6	1.0	3.6	4.5	1.9	1.0
40	3.6	5.3	2.9	1.3	3.6	5.4	3.3	1.3
50	3.2	5.8	4.1	1.5	3.2	5.9	4.5	1.7
60	2.6	5.9	5.1	1.9	2.6	5.8	5.5	2.1
70	1.9	5.4	5.7	2.3	1.9	5.3	6.1	2.6
80	1.2	4.5	6.1	2.8	1.2	4.3	6.4	3.1
90	0.6	3.2	6.0	3.3	0.6	3.1	6.2	3.6
100	0.2	1.8	5.5	3.8	0.2	1.7	5.5	4.1
110	0.1	0.5	4.6	4.2	0.1	0.3	4.6	4.5
120	0.3	-0.8	3.5	4.4	0.2	-0.9	3.3	4.6
130	0.7	-1.8	2.1	4.4	0.6	-1.8	1.9	4.6
140	1.3	-2.4	0.7	4.2	1.2	-2.3	0.5	4.3
150	2.0	-2.6	-0.6	3.7	1.9	-2.4	-0.9	3.8
160	2.7	-2.4	-1.8	3.0	2.6	-2.1	-2.0	3.0
170	3.2	-1.8	-2.7	2.1	3.1	-1.5	-2.9	2.0
180	3.4	-1.0	-3.3	1.0	3.3	-0.7	-3.4	0.8
190	3.4	-0.2	-3.6	-0.2	3.3	0.2	-3.6	-0.4
200	2.9	0.7	-3.6	-1.4	2.9	1.0	-3.5	-1.6
210	2.1	1.4	-3.3	-2.5	2.1	1.6	-3.1	-2.7
220	1.0	1.7	-2.9	-3.5	1.0	1.9	-2.6	-3.7
230	-0.4	1.7	-2.3	-4.2	-0.3	1.8	-2.1	-4.4
240	-1.8	1.4	-1.8	-4.8	-1.8	1.3	-1.5	-4.9
250	-3.3	0.6	-1.3	-5.0	-3.2	0.4	-1.1	-5.1
260	-4.6	-0.4	-1.0	-5.0	-4.5	-0.7	-0.9	-5.0
270	-5.5	-1.6	-0.9	-4.7	-5.4	-2.0	-0.9	-4.7
280	-6.1	-2.8	-1.0	-4.2	-6.0	-3.2	-1.1	-4.1
290	-6.3	-3.9	-1.3	-3.5	-6.2	-4.3	-1.5	-3.5
300	-5.9	-4.7	-1.6	-2.8	-5.9	-5.0	-1.9	-2.8
310	-5.2	-5.1	-2.0	-2.1	-5.1	-5.4	-2.4	-2.1
320	-4.0	-5.0	-2.3	-1.3	-4.0	-5.2	-2.7	-1.4
330	-2.6	-4.5	-2.5	-0.7	-2.6	-4.6	-2.9	-0.8
340	-1.1	-3.5	-2.5	-0.2	-1.1	-3.5	-2.8	-0.3
350	0.3	-2.1	-2.2	0.2	0.3	-2.0	-2.4	0.1

Изменение продолжительности перелета ΔT («длинная» траектория)

t_0 [сут]	0	46	91	137	183	228	274	320
Ω_0 [град]	ΔT [сутки] : -2.3 ÷ 2.4 (0.87%)							
0	0.6	-0.2	-0.6	0.2	0.6	-0.1	-0.6	0.1
10	1.0	0.4	-0.3	0.3	1.0	0.5	-0.2	0.2
20	1.2	1.1	0.1	0.3	1.2	1.1	0.2	0.3
30	1.4	1.6	0.6	0.4	1.3	1.7	0.7	0.4
40	1.3	2.0	1.1	0.5	1.3	2.0	1.2	0.5
50	1.2	2.2	1.5	0.6	1.2	2.2	1.7	0.6
60	1.0	2.2	1.9	0.7	1.0	2.2	2.0	0.8
70	0.7	2.0	2.1	0.9	0.7	2.0	2.3	1.0
80	0.4	1.7	2.3	1.0	0.4	1.6	2.4	1.1
90	0.2	1.2	2.2	1.2	0.2	1.1	2.3	1.3
100	0.1	0.7	2.0	1.4	0.1	0.6	2.1	1.5
110	0.0	0.2	1.7	1.5	0.0	0.1	1.7	1.7
120	0.1	-0.3	1.3	1.6	0.1	-0.3	1.2	1.7
130	0.3	-0.7	0.8	1.6	0.2	-0.7	0.7	1.7
140	0.5	-0.9	0.3	1.6	0.5	-0.9	0.2	1.6
150	0.7	-1.0	-0.2	1.4	0.7	-0.9	-0.3	1.4
160	1.0	-0.9	-0.7	1.1	1.0	-0.8	-0.8	1.1
170	1.2	-0.7	-1.0	0.8	1.1	-0.6	-1.1	0.7
180	1.3	-0.4	-1.2	0.4	1.2	-0.3	-1.3	0.3
190	1.3	-0.1	-1.3	-0.1	1.2	0.1	-1.3	-0.2
200	1.1	0.3	-1.3	-0.5	1.1	0.4	-1.3	-0.6
210	0.8	0.5	-1.2	-0.9	0.8	0.6	-1.2	-1.0
220	0.4	0.6	-1.1	-1.3	0.4	0.7	-1.0	-1.4
230	-0.1	0.6	-0.9	-1.6	-0.1	0.7	-0.8	-1.6
240	-0.7	0.5	-0.7	-1.8	-0.7	0.5	-0.6	-1.8
250	-1.2	0.2	-0.5	-1.9	-1.2	0.2	-0.4	-1.9
260	-1.7	-0.2	-0.4	-1.8	-1.7	-0.3	-0.3	-1.8
270	-2.1	-0.6	-0.3	-1.7	-2.0	-0.7	-0.3	-1.7
280	-2.3	-1.0	-0.4	-1.5	-2.2	-1.2	-0.4	-1.5
290	-2.3	-1.4	-0.5	-1.3	-2.3	-1.6	-0.5	-1.3
300	-2.2	-1.7	-0.6	-1.0	-2.2	-1.9	-0.7	-1.0
310	-1.9	-1.9	-0.7	-0.8	-1.9	-2.0	-0.9	-0.8
320	-1.5	-1.9	-0.9	-0.5	-1.5	-1.9	-1.0	-0.5
330	-1.0	-1.7	-0.9	-0.3	-1.0	-1.7	-1.1	-0.3
340	-0.4	-1.3	-0.9	-0.1	-0.4	-1.3	-1.0	-0.1
350	0.1	-0.8	-0.8	0.1	0.1	-0.7	-0.9	0.0

Изменение оптимального числа витков ΔN («длинная» траектория)

t_0 [сут]	0	46	91	137	183	228	274	320
Ω_0 [град]	$\Delta N : -2 \div 2$							
0	—	-1	-1	—	—	-1	-1	—
10	+1	—	-1	—	+1	—	-1	—
20	+1	+1	—	—	+1	+1	—	—
30	+1	+1	—	—	+1	+1	—	—
40	+1	+2	—	—	+1	+2	+1	—
50	+1	+2	+1	—	+1	+2	+1	—
60	+1	+2	+1	—	+1	+2	+1	—
70	+1	+2	+1	—	+1	+2	+2	—
80	—	+2	+2	—	—	+2	+2	—
90	—	+1	+2	—	—	+1	+2	—
100	—	+1	+2	—	—	+1	+2	—
110	-1	—	+2	+1	-1	—	+1	+1
120	-1	—	+1	+1	-1	—	+1	+1
130	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1
140	—	-1	—	+1	—	-1	—	+1
150	—	-1	—	+1	—	-1	—	+1
160	—	-1	—	+1	—	-1	-1	+1
170	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1
180	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1
190	+1	-1	-1	—	+1	—	-1	—
200	+1	—	-1	—	+1	—	-1	—
210	+1	—	-1	—	+1	—	-1	-1
220	+1	—	-1	-1	+1	+1	-1	-1
230	—	+1	-1	-1	—	+1	-1	-1
240	—	+1	-1	-2	—	+1	-1	-2
250	—	+1	-1	-2	-1	—	-1	-2
260	-1	—	—	-2	-1	—	—	-2
270	-2	—	—	-2	-2	—	—	-2
280	-2	-1	—	-2	-2	-1	—	-2
290	-2	-1	—	-1	-2	-1	—	-1
300	-2	-1	—	-1	-2	-1	—	-1
310	-2	-2	—	-1	-2	-2	-1	-1
320	-2	-2	-1	—	-2	-2	-1	—
330	-1	-2	-1	—	-1	-2	-1	—
340	-1	-1	-1	—	-1	-1	-1	—
350	—	-1	-1	—	—	-1	-1	—

Изменение массы рабочего вещества $\Delta M_{РВ}$ («очень длинная» траектория)

t_0 [сут]	0	46	91	137	183	228	274	320
Ω_0 [град]	$\Delta M_{РВ}$ [кг] : -9.0 ÷ 8.9 (1%)							
0	1.9	-1.4	-1.8	1.4	1.8	-1.2	-1.9	1.2
10	3.8	1.0	-0.7	2.1	3.7	1.2	-0.7	1.9
20	5.3	3.3	0.6	2.6	5.3	3.6	0.8	2.4
30	6.2	5.5	2.1	2.9	6.2	5.8	2.4	2.8
40	6.6	7.2	3.7	3.1	6.6	7.4	4.1	3.1
50	6.4	8.4	5.1	3.3	6.5	8.5	5.6	3.3
60	5.7	8.9	6.4	3.4	5.8	9.0	6.9	3.5
70	4.7	8.7	7.4	3.5	4.8	8.7	7.8	3.8
80	3.5	7.9	7.9	3.7	3.6	7.7	8.3	4.0
90	2.3	6.5	8.1	4.0	2.4	6.3	8.3	4.3
100	1.2	4.7	7.7	4.3	1.3	4.5	7.9	4.7
110	0.5	2.8	6.9	4.6	0.5	2.6	6.9	5.0
120	0.1	0.9	5.8	4.8	0.1	0.7	5.6	5.2
130	0.2	-0.8	4.3	5.0	0.1	-0.9	4.1	5.3
140	0.5	-2.1	2.7	5.0	0.5	-2.1	2.3	5.2
150	1.2	-2.9	1.0	4.7	1.1	-2.7	0.6	4.8
160	2.0	-3.1	-0.6	4.2	1.9	-2.9	-1.0	4.2
170	2.7	-2.9	-2.1	3.4	2.6	-2.6	-2.3	3.3
180	3.3	-2.3	-3.2	2.3	3.2	-2.0	-3.4	2.1
190	3.6	-1.5	-4.0	1.0	3.5	-1.1	-4.1	0.7
200	3.4	-0.6	-4.4	-0.5	3.3	-0.2	-4.4	-0.8
210	2.7	0.2	-4.6	-2.1	2.7	0.5	-4.5	-2.4
220	1.5	0.8	-4.5	-3.6	1.5	1.0	-4.3	-3.9
230	-0.0	0.9	-4.2	-5.0	-0.0	1.1	-3.9	-5.3
240	-1.9	0.7	-3.8	-6.2	-1.8	0.6	-3.5	-6.4
250	-3.9	-0.1	-3.4	-7.0	-3.8	-0.2	-3.2	-7.1
260	-5.8	-1.2	-3.1	-7.4	-5.6	-1.4	-3.0	-7.5
270	-7.4	-2.5	-2.9	-7.5	-7.2	-2.9	-2.9	-7.5
280	-8.5	-4.0	-2.9	-7.1	-7.1	-4.4	-2.9	-7.1
290	-9.0	-5.4	-3.0	-6.5	-8.9	-5.8	-3.1	-6.4
300	-8.9	-6.5	-3.1	-5.5	-8.8	-6.9	-3.4	-5.4
310	-8.1	-7.1	-3.3	-4.3	-8.1	-7.4	-3.7	-4.3
320	-6.7	-7.1	-3.4	-3.1	-6.7	-7.4	-3.8	-3.1
330	-4.8	-6.5	-3.4	-1.8	-4.9	-6.7	-3.8	-1.8
340	-2.6	-5.3	-3.2	-0.6	-2.7	-5.3	-3.5	-0.7
350	-0.3	-3.6	-2.6	0.5	-0.4	-3.5	-2.9	0.4

Изменение продолжительности перелета ΔT («очень длинная» траектория)

t_0 [сут]	0	46	91	137	183	228	274	320
Ω_0 [град]	ΔT [сутки] : -3.3 ÷ 3.3 (1%)							
0	0.7	-0.5	-0.7	0.5	0.7	-0.5	-0.7	0.5
10	1.4	0.4	-0.3	0.8	1.4	0.5	-0.3	0.7
20	2.0	1.2	0.2	0.9	2.0	1.3	0.3	0.9
30	2.3	2.0	0.8	1.1	2.3	2.1	0.9	1.0
40	2.5	2.7	1.4	1.2	2.5	2.8	1.5	1.1
50	2.4	3.1	1.9	1.2	2.4	3.2	2.1	1.2
60	2.1	3.3	2.4	1.3	2.1	3.3	2.6	1.3
70	1.7	3.2	2.7	1.3	1.8	3.2	2.9	1.4
80	1.3	2.9	2.9	1.4	1.3	2.9	3.1	1.5
90	0.8	2.4	3.0	1.5	0.9	2.3	3.1	1.6
100	0.5	1.7	2.9	1.6	0.5	1.7	2.9	1.7
110	0.2	1.0	2.6	1.7	0.2	1.0	2.6	1.8
120	0.0	0.3	2.1	1.8	0.1	0.3	2.1	1.9
130	0.1	-0.3	1.6	1.9	0.0	-0.3	1.5	2.0
140	0.2	-0.8	1.0	1.8	0.2	-0.8	0.9	1.9
150	0.4	-1.1	0.4	1.8	0.4	-1.0	0.2	1.8
160	0.7	-1.2	-0.2	1.6	0.7	-1.1	-0.4	1.6
170	1.0	-1.1	-0.8	1.3	1.0	-1.0	-0.9	1.2
180	1.2	-0.9	-1.2	0.9	1.2	-0.7	-1.3	0.8
190	1.3	-0.6	-1.5	0.4	1.3	-0.4	-1.5	0.3
200	1.3	-0.2	-1.6	-0.2	1.2	-0.1	-1.6	-0.3
210	1.0	0.1	-1.7	-0.8	1.0	0.2	-1.7	-0.9
220	0.6	0.3	-1.7	-1.3	0.6	0.4	-1.6	-1.5
230	-0.0	0.3	-1.5	-1.9	-0.0	0.4	-1.5	-2.0
240	-0.7	0.2	-1.4	-2.3	-0.7	0.2	-1.3	-2.4
250	-1.4	-0.0	-1.3	-2.6	-1.4	-0.1	-1.2	-2.6
260	-2.1	-0.4	-1.2	-2.8	-2.1	-0.5	-1.1	-2.8
270	-2.7	-0.9	-1.1	-2.8	-2.7	-1.1	-1.1	-2.8
280	-3.1	-1.5	-1.1	-2.6	-2.6	-1.6	-1.1	-2.6
290	-3.3	-2.0	-1.1	-2.4	-3.3	-2.2	-1.2	-2.4
300	-3.3	-2.4	-1.2	-2.0	-3.3	-2.5	-1.3	-2.0
310	-3.0	-2.6	-1.2	-1.6	-3.0	-2.8	-1.4	-1.6
320	-2.5	-2.6	-1.3	-1.1	-2.5	-2.7	-1.4	-1.1
330	-1.8	-2.4	-1.3	-0.7	-1.8	-2.5	-1.4	-0.7
340	-1.0	-2.0	-1.2	-0.2	-1.0	-2.0	-1.3	-0.2
350	-0.1	-1.3	-1.0	0.2	-0.2	-1.3	-1.1	0.1

Изменение оптимального числа витков ΔN («очень длинная» траектория)

t_0 [сут]	0	46	91	137	183	228	274	320
Ω_0 [град]	$\Delta N : -2 \div 3$							
0	—	—	—	+1	—	—	—	+1
10	+1	—	—	+1	+1	—	—	+1
20	+2	+1	—	+1	+2	+1	—	+1
30	+2	+1	+1	+1	+2	+1	+1	+1
40	+2	+2	+1	+1	+2	+2	+1	+1
50	+2	+2	+1	+1	+2	+2	+1	+1
60	+2	+3	+1	+1	+2	+3	+2	+1
70	+2	+3	+2	+1	+2	+3	+2	+1
80	+2	+3	+2	+1	+2	+3	+2	+1
90	+1	+2	+2	+1	+1	+2	+2	+1
100	+1	+2	+2	+1	+1	+2	+2	+1
110	—	+1	+2	+1	—	+1	+2	+1
120	—	—	+2	+1	—	+1	+2	+1
130	—	—	+2	+1	—	—	+2	+1
140	—	—	+1	+1	—	—	+1	+1
150	—	—	+1	+1	—	-1	+1	+1
160	—	-1	+1	+1	—	-1	+1	+1
170	—	-1	—	+1	—	-1	—	+1
180	—	-1	—	+1	—	-1	—	+1
190	+1	-1	—	+1	+1	-1	—	+1
200	+1	-1	-1	+1	+1	—	-1	+1
210	+1	—	-1	+1	+1	—	-1	+1
220	+1	—	-1	—	+1	—	-1	—
230	+1	—	-1	—	+1	—	-1	—
240	—	—	-1	-1	—	—	-1	-1
250	—	—	-1	-1	—	—	-1	-1
260	-1	—	-1	-2	-1	—	-1	-2
270	-1	—	-1	-2	-1	—	-1	-2
280	-2	-1	-1	-2	-2	-1	-1	-2
290	-2	-1	-1	-2	-2	-1	-1	-2
300	-2	-1	-1	-2	-2	-1	-1	-2
310	-2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-2
320	-2	-1	-1	-1	-1	-2	-1	-1
330	-1	-1	—	-1	-1	-1	-1	-1
340	-1	-1	—	—	-1	-1	—	—
350	—	-1	—	—	—	-1	—	—

Изменение массы рабочего вещества $\Delta M_{РВ}$ (для «легкого» КА)

t_0 [сут]	0	46	91	137	183	228	274	320
Ω_0 [град]	$\Delta M_{РВ}$ [кг] : -2.2 ÷ 2.1 (0.68%)							
0	1.0	-0.4	-1.0	0.4	1.0	-0.3	-1.0	0.4
10	1.3	0.2	-0.9	0.1	1.2	0.3	-0.9	0.1
20	1.3	0.8	-0.6	-0.1	1.3	0.9	-0.6	-0.1
30	1.3	1.3	-0.3	-0.4	1.2	1.4	-0.2	-0.4
40	1.0	1.7	0.2	-0.5	0.9	1.7	0.3	-0.5
50	0.6	1.9	0.7	-0.5	0.6	1.9	0.8	-0.5
60	0.2	1.9	1.2	-0.5	0.2	1.8	1.3	-0.4
70	-0.2	1.7	1.6	-0.2	-0.3	1.6	1.7	-0.2
80	-0.6	1.3	1.9	0.1	-0.6	1.2	2.0	0.2
90	-0.8	0.8	2.0	0.5	-0.8	0.7	2.1	0.6
100	-0.9	0.2	2.0	0.9	-0.9	0.1	2.0	1.0
110	-0.8	-0.4	1.7	0.9	-0.8	-0.5	1.7	1.4
120	-0.6	-0.9	1.3	1.6	-0.6	-1.0	1.3	1.7
130	-0.2	-1.3	0.8	1.8	-0.2	-1.3	0.7	1.9
140	0.2	-1.5	0.2	1.9	0.3	-1.5	0.1	2.0
150	0.7	-1.6	-0.4	1.8	0.7	-1.5	-0.5	1.8
160	1.2	-1.4	-1.0	1.5	1.2	-1.3	-1.1	1.5
170	1.6	-1.1	-1.5	1.1	1.5	-0.9	-1.5	1.1
180	1.8	-0.6	-1.8	0.5	1.7	-0.4	-1.8	0.5
190	1.8	-0.1	-1.9	-0.1	1.8	0.1	-1.9	-0.1
200	1.7	0.4	-1.8	-0.7	1.6	0.6	-1.8	-0.7
210	1.3	0.9	-1.6	-1.2	1.3	1.0	-1.6	-1.3
220	0.9	1.2	-1.3	-1.6	0.8	1.3	-1.2	-1.7
230	0.2	1.4	-0.8	-1.9	0.2	1.4	-0.7	-2.0
240	-0.4	1.3	-0.3	-2.0	-0.4	1.3	-0.3	-2.1
250	-1.1	1.1	0.1	-2.0	-1.0	1.0	0.2	-2.1
260	-1.6	0.7	0.4	-1.8	-1.6	0.6	0.5	-1.8
270	-2.0	0.2	0.7	-1.4	-1.9	0.1	0.7	-1.5
280	-2.2	-0.3	0.8	-1.0	-2.1	-0.5	0.8	-1.0
290	-2.2	-0.8	0.7	-0.5	-2.1	-1.0	0.7	-0.6
300	-2.0	-1.3	0.5	-0.1	-1.9	-1.4	0.5	-0.1
310	-1.6	-1.6	0.2	0.3	-1.5	-1.7	0.2	0.3
320	-1.1	-1.8	-0.1	0.6	-1.0	-1.8	-0.2	0.6
330	-0.5	-1.7	-0.4	0.7	-0.5	-1.7	-0.5	0.7
340	0.1	-1.4	-0.7	0.7	0.1	-1.4	-0.8	0.7
350	0.6	-1.0	-0.9	0.6	0.6	-0.9	-1.0	0.6

Изменение продолжительности перелета ΔT (для «легкого» КА)

t_0 [сут]	0	46	91	137	183	228	274	320
Ω_0 [град]	ΔT [сутки] : $-0.8 \div 0.8$ (0.68%)							
0	0.4	-0.2	-0.4	0.1	0.4	-0.1	-0.4	0.1
10	0.5	0.1	-0.3	0.0	0.5	0.1	-0.3	0.1
20	0.5	0.3	-0.2	-0.1	0.5	0.3	-0.2	-0.0
30	0.5	0.5	-0.1	-0.1	0.4	0.5	-0.1	-0.1
40	0.4	0.6	0.1	-0.2	0.3	0.6	0.1	-0.2
50	0.2	0.7	0.3	-0.2	0.2	0.7	0.3	-0.2
60	0.1	0.7	0.5	-0.2	0.1	0.7	0.5	-0.2
70	-0.1	0.6	0.6	-0.1	-0.1	0.6	0.6	-0.1
80	-0.2	0.5	0.7	0.0	-0.2	0.4	0.7	0.1
90	-0.3	0.3	0.8	0.2	-0.3	0.2	0.8	0.2
100	-0.3	0.1	0.7	0.3	-0.3	0.0	0.7	0.4
110	-0.3	-0.1	0.6	0.3	-0.3	-0.2	0.6	0.5
120	-0.2	-0.3	0.5	0.6	-0.2	-0.4	0.5	0.6
130	-0.1	-0.5	0.3	0.7	-0.1	-0.5	0.3	0.7
140	0.1	-0.6	0.1	0.7	0.1	-0.6	0.0	0.7
150	0.3	-0.6	-0.2	0.7	0.3	-0.5	-0.2	0.7
160	0.4	-0.5	-0.4	0.6	0.4	-0.5	-0.4	0.6
170	0.6	-0.4	-0.5	0.4	0.6	-0.3	-0.6	0.4
180	0.7	-0.2	-0.7	0.2	0.6	-0.2	-0.7	0.2
190	0.7	-0.0	-0.7	-0.0	0.7	0.0	-0.7	-0.0
200	0.6	0.2	-0.7	-0.2	0.6	0.2	-0.7	-0.3
210	0.5	0.3	-0.6	-0.4	0.5	0.4	-0.6	-0.5
220	0.3	0.4	-0.5	-0.6	0.3	0.5	-0.4	-0.6
230	0.1	0.5	-0.3	-0.7	0.1	0.5	-0.3	-0.7
240	-0.2	0.5	-0.1	-0.8	-0.2	0.5	-0.1	-0.8
250	-0.4	0.4	0.0	-0.7	-0.4	0.4	0.1	-0.8
260	-0.6	0.3	0.2	-0.7	-0.6	0.2	0.2	-0.7
270	-0.7	0.1	0.2	-0.5	-0.7	0.0	0.3	-0.5
280	-0.8	-0.1	0.3	-0.4	-0.8	-0.2	0.3	-0.4
290	-0.8	-0.3	0.3	-0.2	-0.8	-0.4	0.3	-0.2
300	-0.7	-0.5	0.2	-0.0	-0.7	-0.5	0.2	-0.0
310	-0.6	-0.6	0.1	0.1	-0.6	-0.6	0.1	0.1
320	-0.4	-0.7	-0.0	0.2	-0.4	-0.7	-0.1	0.2
330	-0.2	-0.6	-0.2	0.3	-0.2	-0.6	-0.2	0.3
340	0.0	-0.5	-0.3	0.3	0.0	-0.5	-0.3	0.3
350	0.2	-0.4	-0.3	0.2	0.2	-0.3	-0.4	0.2

Изменение оптимального числа витков ΔN (для «легкого» КА)

t_0 [сут]	0	46	91	137	183	228	274	320
Ω_0 [град]	$\Delta N : 0 \div 1$							
0	+1	—	—	+1	+1	—	—	+1
10	+1	+1	—	+1	+1	+1	—	+1
20	+1	+1	—	—	+1	+1	—	—
30	+1	+1	—	—	+1	+1	—	—
40	+1	+1	—	—	+1	+1	—	—
50	+1	+1	+1	—	+1	+1	+1	—
60	+1	+1	+1	—	+1	+1	+1	—
70	—	+1	+1	—	—	+1	+1	—
80	—	+1	+1	—	—	+1	+1	—
90	—	+1	+1	+1	—	+1	+1	+1
100	—	+1	+1	+1	—	+1	+1	+1
110	—	—	+1	+1	—	—	+1	+1
120	—	—	+1	+1	—	—	+1	+1
130	—	—	+1	+1	—	—	+1	+1
140	—	—	+1	+1	—	—	+1	+1
150	+1	—	—	+1	+1	—	—	+1
160	+1	—	—	+1	+1	—	—	+1
170	+1	—	—	+1	+1	—	—	+1
180	+1	—	—	+1	+1	—	—	+1
190	+1	—	**	+1	+1	—	**	+1
200	+1	+1	—	—	+1	+1	—	—
210	+1	+1	—	—	+1	+1	—	—
220	+1	+1	—	—	+1	+1	—	—
230	+1	+1	—	—	+1	+1	—	—
240	—	+1	—	**	—	+1	—	**
250	—	+1	+1	—	—	+1	+1	—
260	—	+1	+1	—	—	+1	+1	—
270	—	+1	+1	—	—	+1	+1	—
280	—	—	+1	—	**	—	+1	—
290	**	—	+1	—	—	—	+1	—
300	—	—	+1	+1	—	—	+1	+1
310	—	—	+1	+1	—	—	+1	+1
320	—	**	+1	+1	—	**	—	+1
330	—	—	—	+1	—	—	—	+1
340	+1	—	—	+1	+1	—	—	+1
350	+1	—	—	+1	+1	—	—	+1

Итоговые результаты

Основные результаты сведены в табл. S.

Таблица S

Изменения характеристик оптимальных траекторий перелета на ГСО из-за возмущений от Солнца

	1	2	3	4	5
ΔN [витки]	—	-1÷2	-2÷2	-2÷3	0÷1
ΔT [сут]	-0.4÷0.6	-1.5÷1.4	-2.3÷2.4	-3.3÷3.3	-0.8÷0.8
ΔM_{PB} [кг]	-1÷1.6	-4÷3.7	-6.3÷6.4	-9÷8.9	-2.2÷2.1
$\Delta T, \Delta M_{PB}$ %	0.84%	0.83%	0.87%	1%	0.68%

Таким образом, для всех рассмотренных траекторий гравитационное влияние Солнца не превышает 1%.

Автор благодарит Петухова В.Г. за полезные консультации и предоставленные данные для расчетов.

Литература

1. Ахметшин Р.З. Плоская задача оптимального перелета космического аппарата с малой тягой с высокоэллиптической орбиты на геостационар // Космические исследования. 2004, т.42, №3, с.248-259; Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. — 2002. — № 37. — 32 с. — URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2002-37>
2. Петухов В.Г. Оптимизация многовитковых перелетов между некомпланарными эллиптическими орбитами // Космические исследования, 2004, т. 42, № 3, с.260-279.
3. Ахметшин Р.З. Возмущения от Луны при многовитковых перелетах на геостационарную орбиту космического аппарата с малой тягой // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. — 2015. — № 107. — 32 с. — URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2015-107>
4. Petukhov V.G., Konstantinov M.S. Easy Engineering Technique of Optimal Electric Propulsion Trajectory Estimation. IAC-06-C4.4.06, 2006.
5. Эльясберг П.Е. Введение в теорию полета искусственных спутников Земли. М., Наука, 1965.
6. Дубошин Г.Н. Небесная механика. Основные задачи и методы. М., Наука, 1975.