

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗМОЖНЫХ ОКОН СТАРТА КА «СПЕКТР-РГ» В ТЕЧЕНИЕ ГОДА С ОБЕСПЕЧЕНИЕМ ЕЖЕСУТОЧНОЙ ВИДИМОСТИ С КИП «МЕДВЕЖЬИ ОЗЁРА»



*П.В.Мжельский, Е.А.Михайлов
НПО им. С.А.Лавочкина*

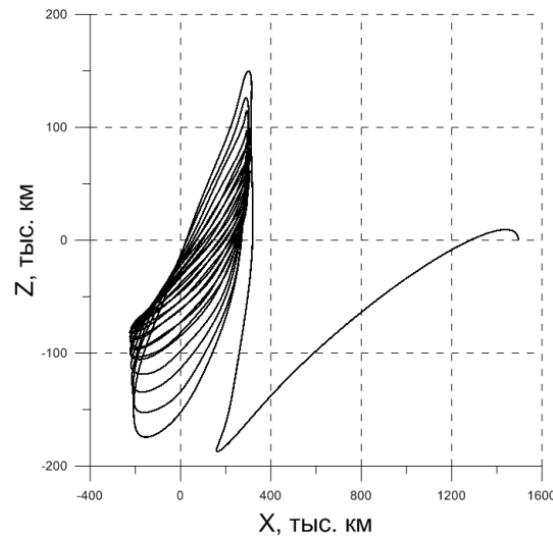
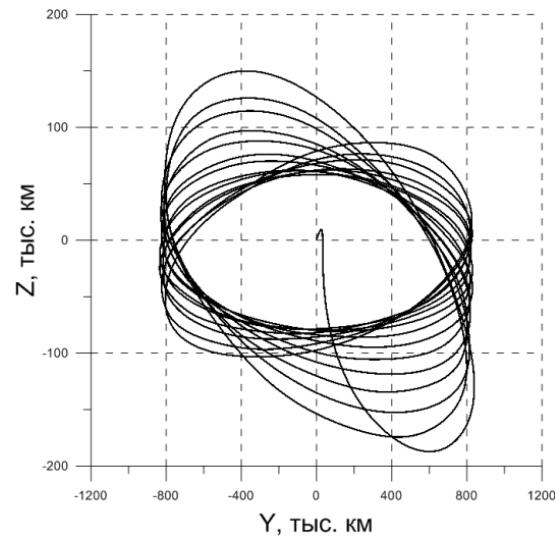
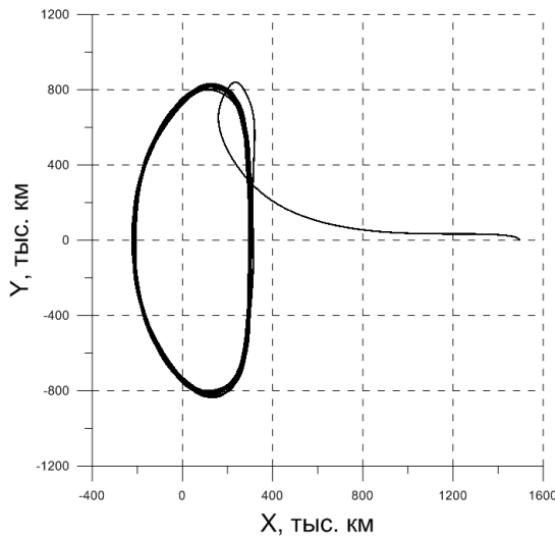
12 ноября 2015

Номинальная орбита «Спектр-РГ»

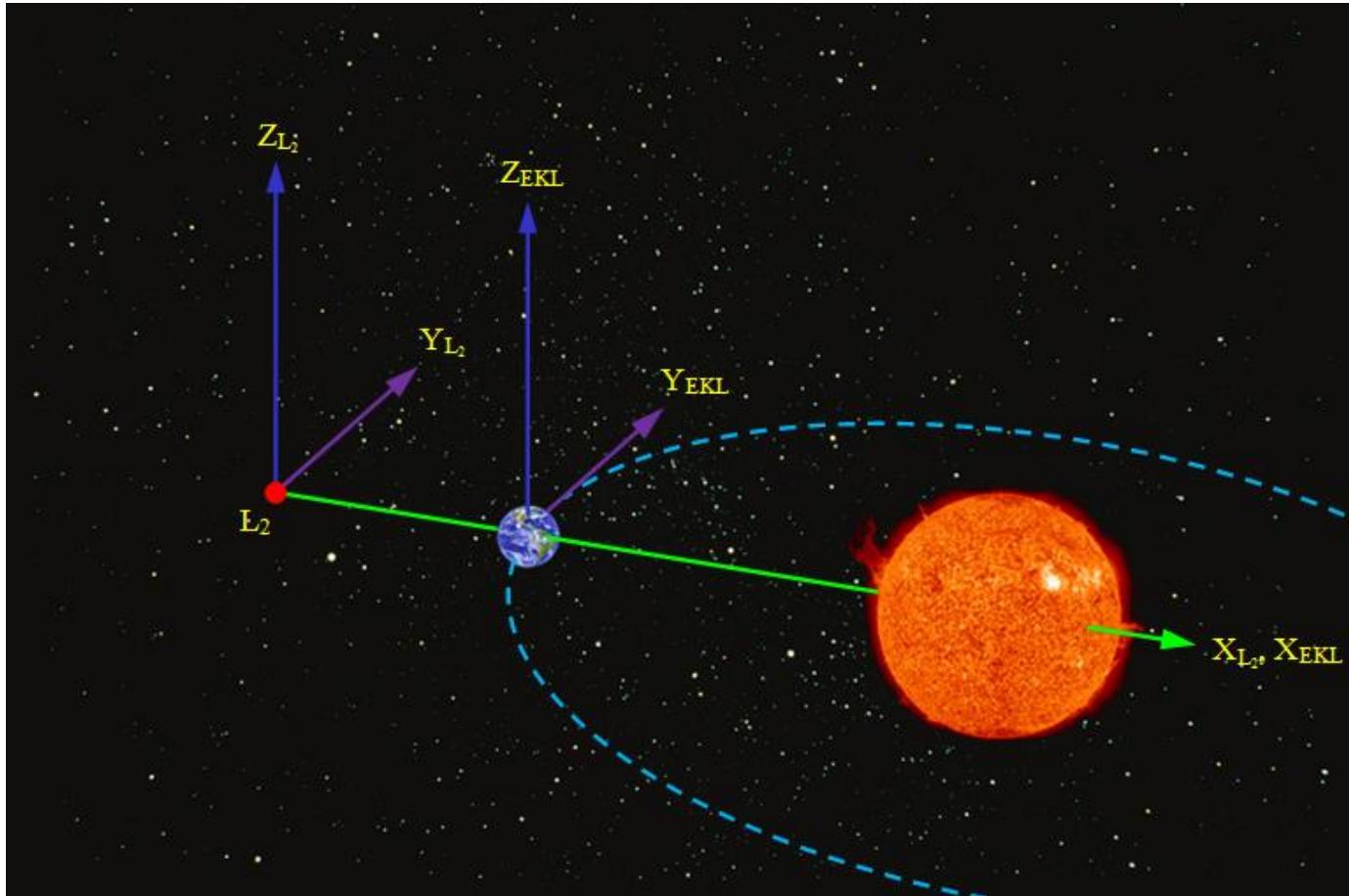
«Спектр-РГ» - космический телескоп, задачей которого является сканирование пространства в рентгеновском и гамма-диапазоне электромагнитного спектра. Предполагается, что КА будет функционировать на орбите вокруг точки либрации L_2 системы Солнце-Земля.

Предполагаемая дата старта: II половина 2017 года.

Прямой перелёт на квазипериодическую орбиту в окрестности точки L_2 системы Солнце-Земля.



Используемые системы координат



оси X_{L2} , X_{EKL} направлены на Солнце;
оси Z_{L2} , Z_{EKL} ортогональны плоскости эклиптики;
оси Y_{L2} , Y_{EKL} лежат в плоскости эклиптики и дополняют систему до правой.

Метод изолиний

Метод изолиний, предложенный М.Л. Лидовым, позволяет связать параметры квазипериодической орбиты с параметрами геоцентрической перелётной траектории. Строятся изолинии функции расстояния перицентра от параметров квазипериодической орбиты в районе точки либрации L_2 системы Солнце-Земля.

Метод позволяет найти траектории перелёта с орбиты ИСЗ на заданную квазипериодическую орбиту, которые не требуют выдачи импульса торможения в окрестности точки L_2 , т.е. осуществляется одноимпульсный переход.

Таким образом, построение изолинии делится на два этапа:

1. Получение квазипериодического решения в рамках задачи трёх тел в окрестности точки L_2 .
2. Вычисление расстояния перицентра орбиты перелёта в невращающейся геоцентрической эклиптической СК.

Следует отметить, что найденная таким образом орбита перелёта является только первым приближением при поиске вектора скорости в перицентре орбиты в полной модели с учётом всех небесных тел.

Получение квазипериодического решения в рамках задачи трёх тел

Решение системы линеаризованных уравнений, описывающих динамику ограниченной круговой задачи трёх тел в окрестности точки L_2 :

$$X_{L_2} = A \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + C e^{\lambda t} + D e^{-\lambda t},$$

$$Y_{L_2} = -k_2 A \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + k_1 (C e^{\lambda t} - D e^{-\lambda t}),$$

$$Z_{L_2} = B \cos(\omega_2 t + \varphi_2),$$

где

$$\omega_1, \omega_2, \lambda, k_1, k_2 = \text{const},$$

A – параметр, характеризующий удаление КА от точки L_2 в плоскости эклиптики,

B – параметр, характеризующий удаление КА от точки L_2 в плоскости, ортогональной эклиптике,

φ_1 – фаза колебательного движения КА в проекции на плоскость эклиптики,

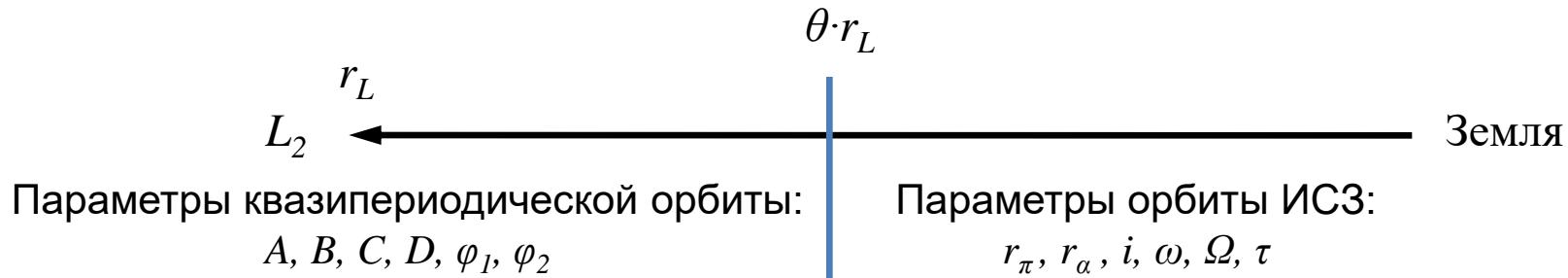
φ_2 – фаза колебательного движения КА в проекции на плоскость, ортогональную эклиптике,

$C e^{\lambda t}$ – возрастающая компонента,

$D e^{-\lambda t}$ – убывающая компонента.

Асимптотическое приближение к условно-периодической орбите определяется условием $C = 0$.

Переход от параметров квазипериодической орбиты к параметрам геоцентрической перелётной траектории



$$r_L \approx 1500000 \text{ км}, \text{расстояние от точки } L_2 \text{ до Земли, } \theta \in \left[\frac{2}{3}, \frac{3}{4} \right]$$

За счёт выбора D обеспечивается сопряжение квазипериодической орбиты с орбитой ИСЗ.

На момент пересечения границы перехода $t=0$ во вращающейся СК с центром в L_2 находится D :

$$D = r_L + x_{EKL}^* - A \cos \varphi_1$$

где

$$x_{EKL}^* = -\theta \cdot r_L.$$

Вычисление r_π по заданным фазам φ_1 и φ_2 при пересечении условной границы перехода

Вектор состояния КА в инерциальной СК, полученной фиксацией осей вращающейся СК на фиксированный момент времени в зависимости от параметров $A, B, \varphi_1, \varphi_2$:

$$X_{L_2} = r_L + x_{EKL}^*,$$

$$Y_{L_2} = -k_2 A \sin \varphi_1 - k_1 D,$$

$$Z_{L_2} = B \cos \varphi_2,$$

$$D = r_L + x_{EKL}^* - A \cos \varphi_1,$$

$$\dot{X}_{L_2} = -\omega_1 A \sin \varphi_1 - \lambda D,$$

$$\dot{Y}_{L_2} = -k_2 \omega_1 A \cos \varphi_1 + k_1 \lambda D,$$

$$\dot{Z}_{L_2} = -\omega_2 B \sin \varphi_2.$$

Вектор состояния КА в невращающейся геоцентрической эклиптической СК:

$$X_{EKL} = X_{L_2} - r_L,$$

$$Y_{EKL} = Y_{L_2},$$

$$Z_{EKL} = Z_{L_2},$$

$$\dot{X}_{EKL} = \dot{X}_{L_2} - n_1 Y_{EKL},$$

$$\dot{Y}_{EKL} = \dot{Y}_{L_2} + n_1 X_{EKL},$$

$$\dot{Z}_{EKL} = \dot{Z}_{L_2}.$$

где n_1 – средняя угловая скорость орбитального движения Земли.

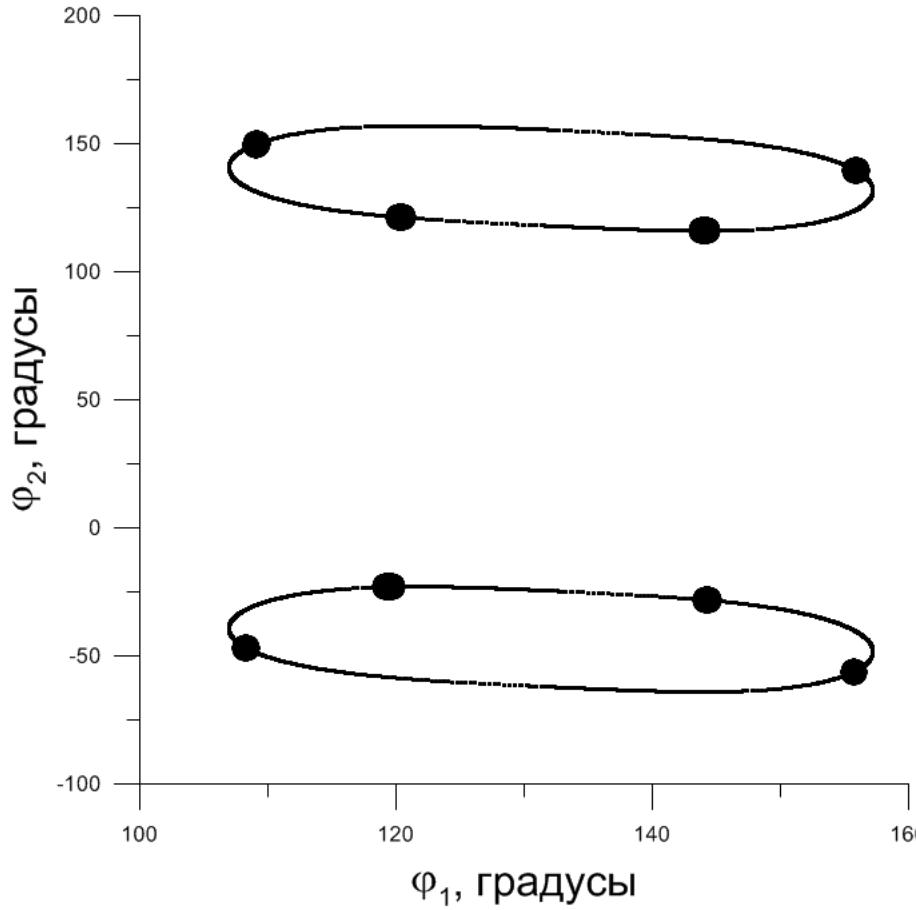
По вектору $(X_{EKL}, Y_{EKL}, Z_{EKL}, \dot{X}_{EKL}, \dot{Y}_{EKL}, \dot{Z}_{EKL})$ вычисляются элементы орбиты, в том числе расстояниеperiцентра r_π .

При фиксированных A, B и $C=0$ изолиния строится в плоскости φ_1, φ_2 : $r_\pi(\varphi_1, \varphi_2) = r_\pi^*$.

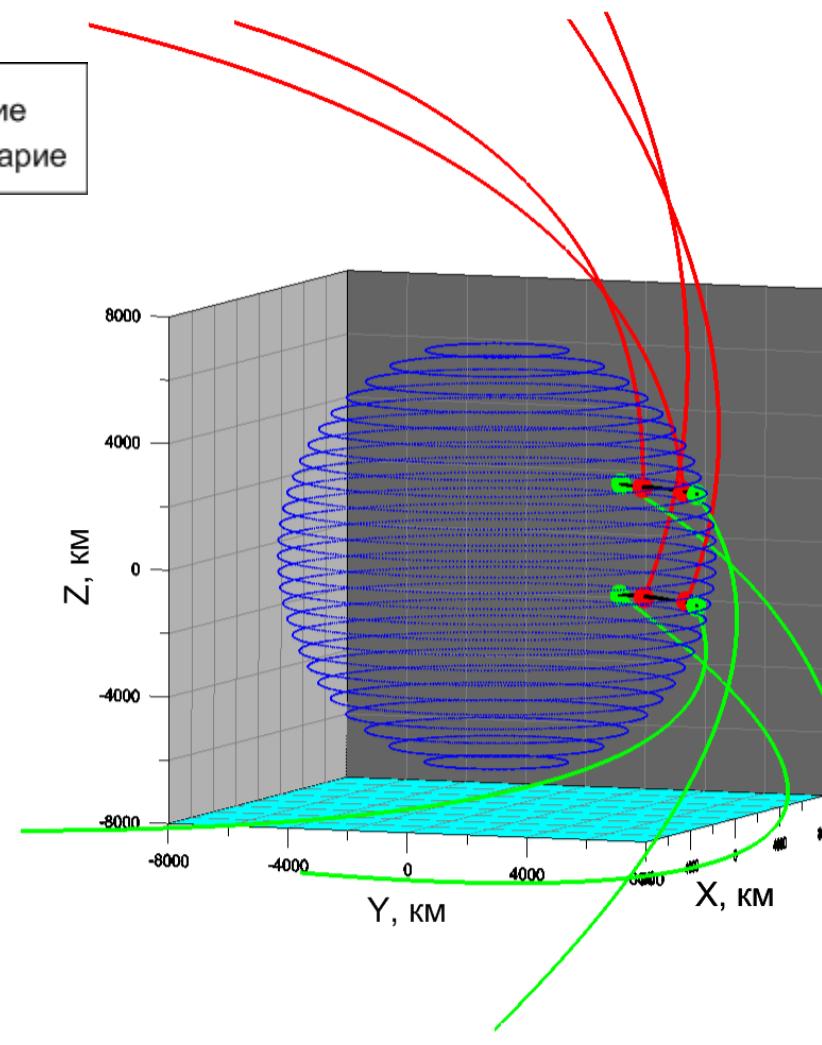
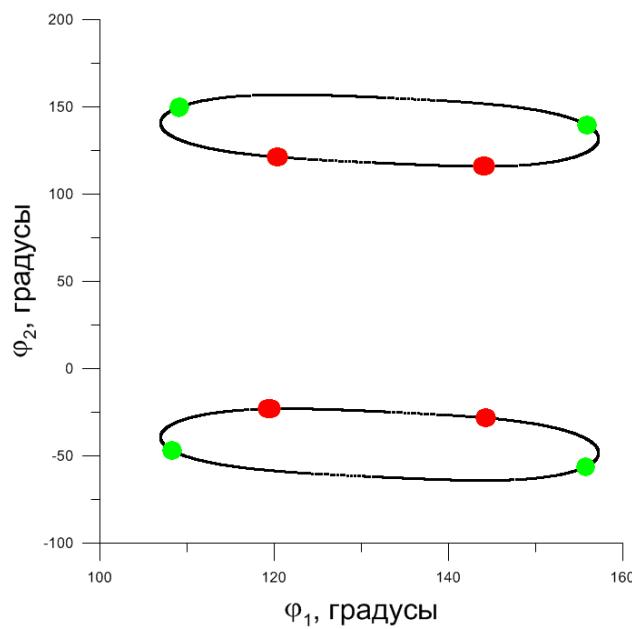
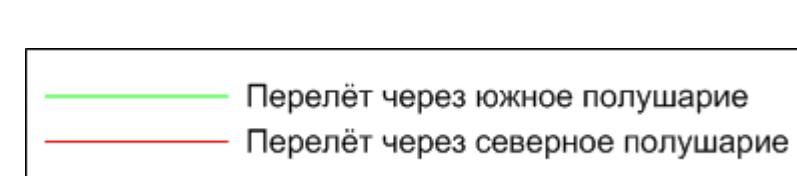
Изолинии функции расстоянияperiцентра и области, выбранные по условию $i \approx 51.7^\circ$

Номинальные параметры, соответствующие орбите КА «Спектр-РГ» :

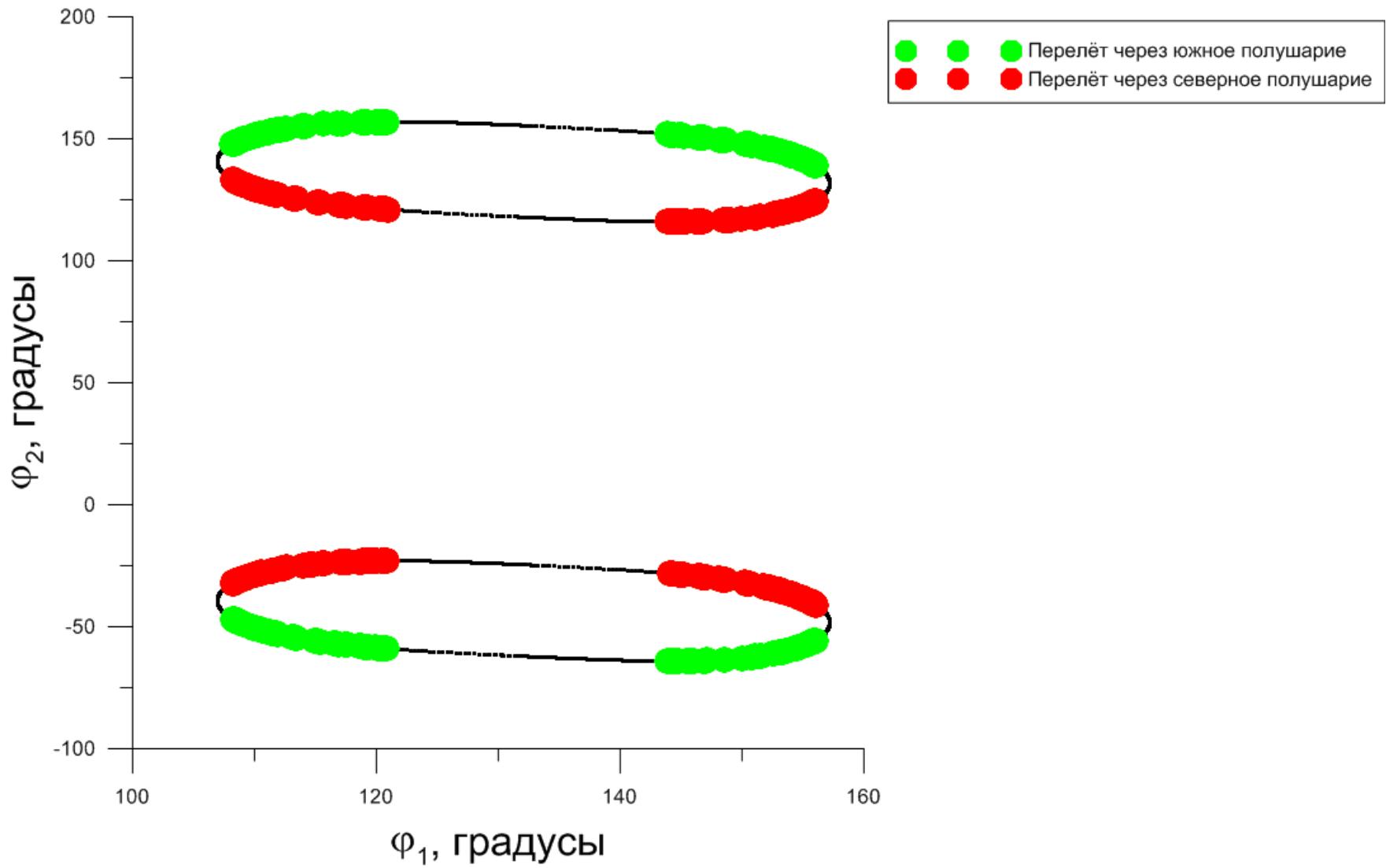
$$A = 300000 \text{ км}, B = 400000 \text{ км}, \theta = \frac{2}{3}, H_\pi^* = 500 \text{ км.}$$



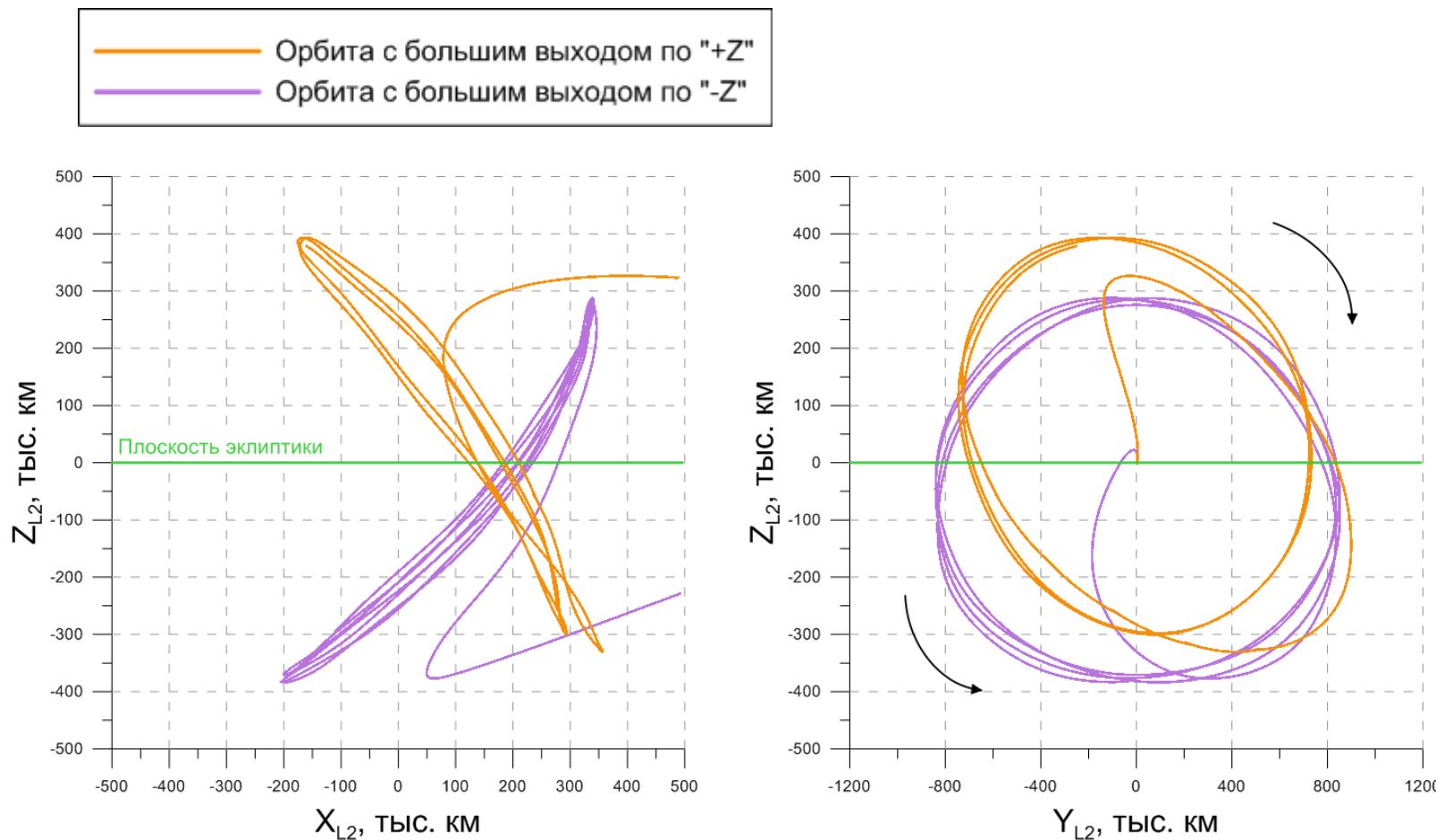
Классификация орбит по направлению перелёта



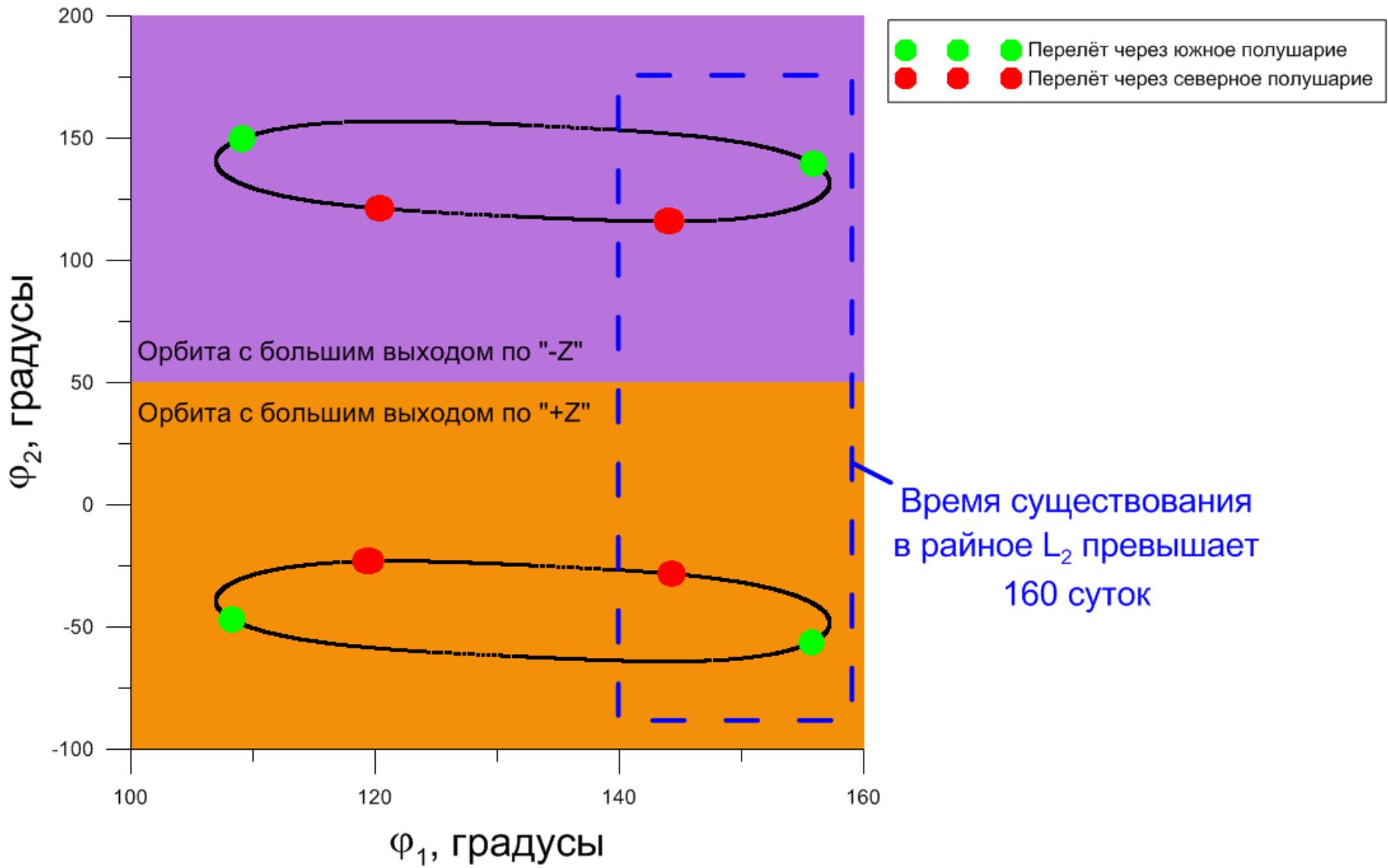
Смещение областей на изолинии при изменении даты старта в течение года



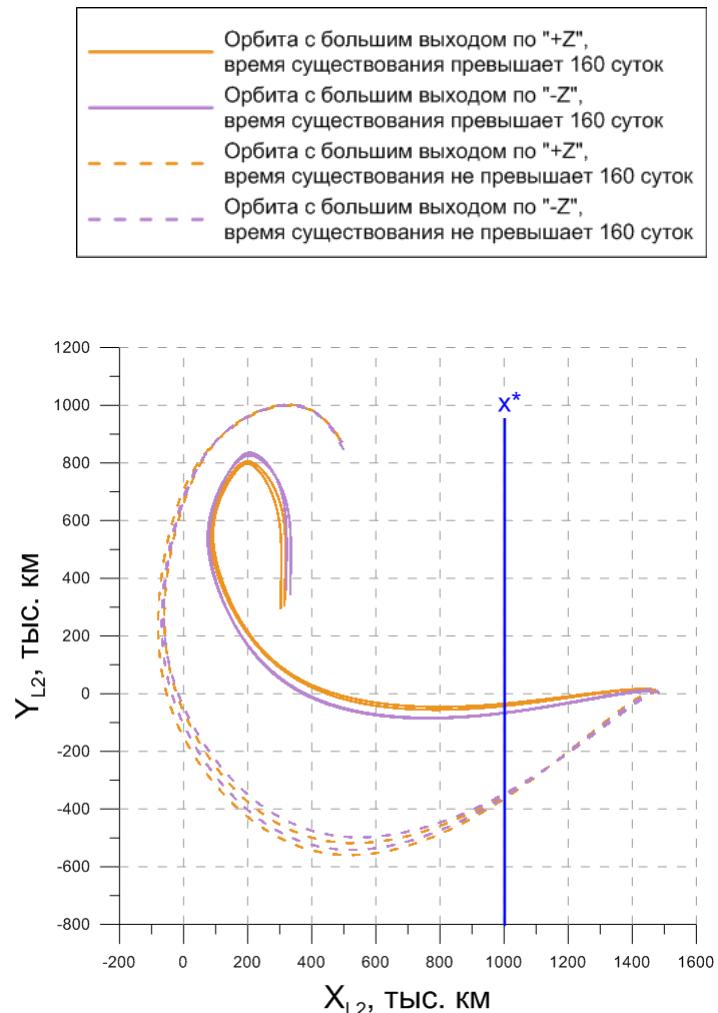
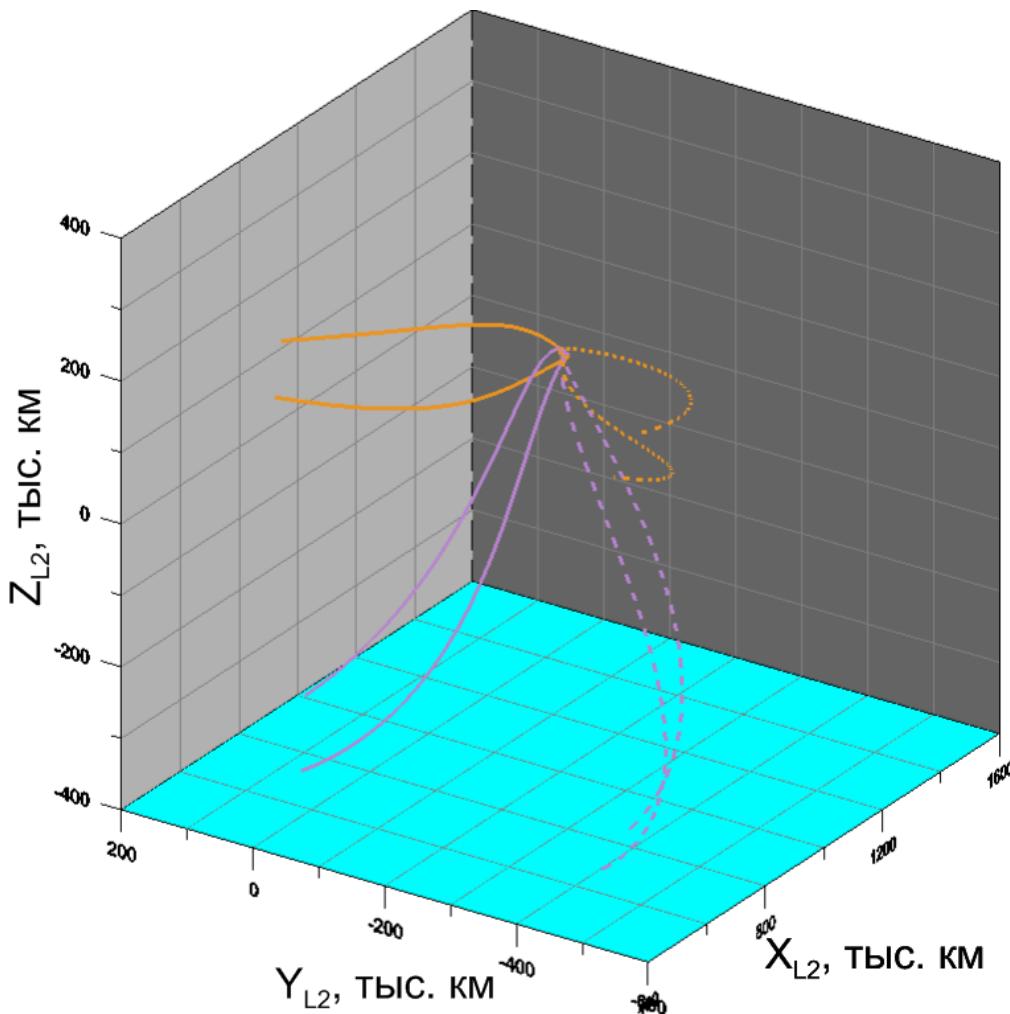
Классификация квазипериодических орбит по выходу из плоскости эклиптики



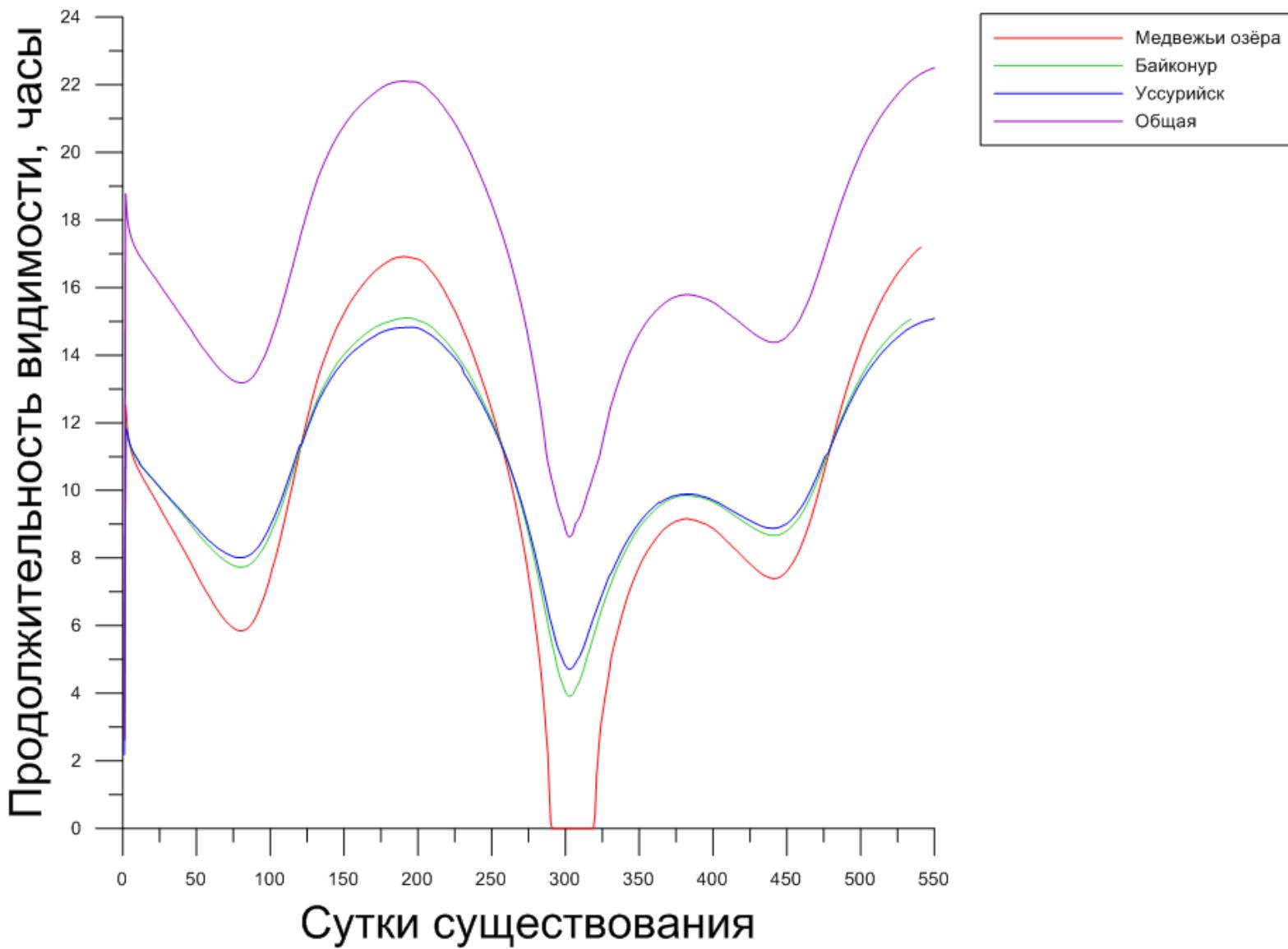
Области на изолинии, соответствующие различным типам орбит



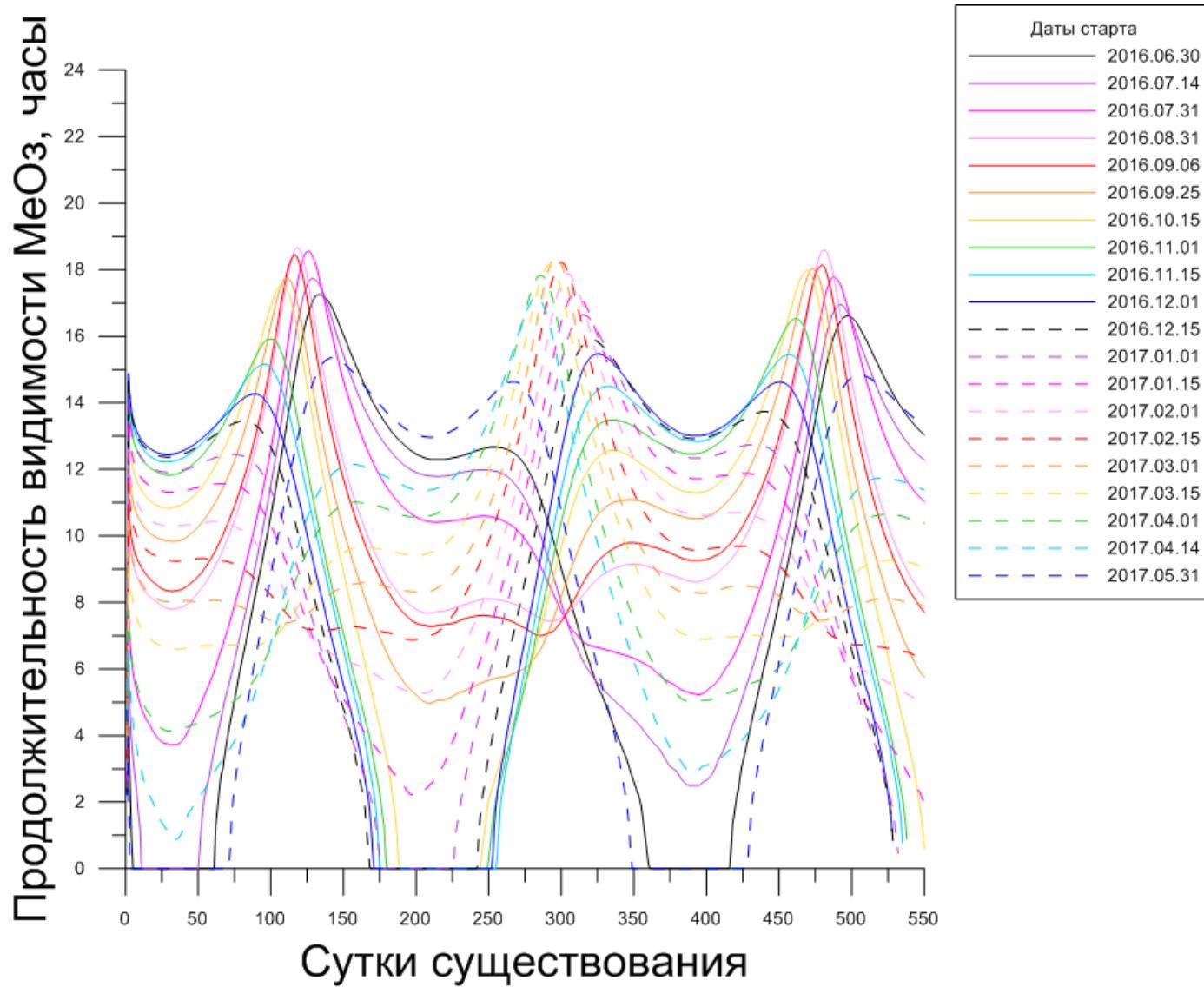
Траектории перелёта в район L_2 для разных типов квазипериодических орбит



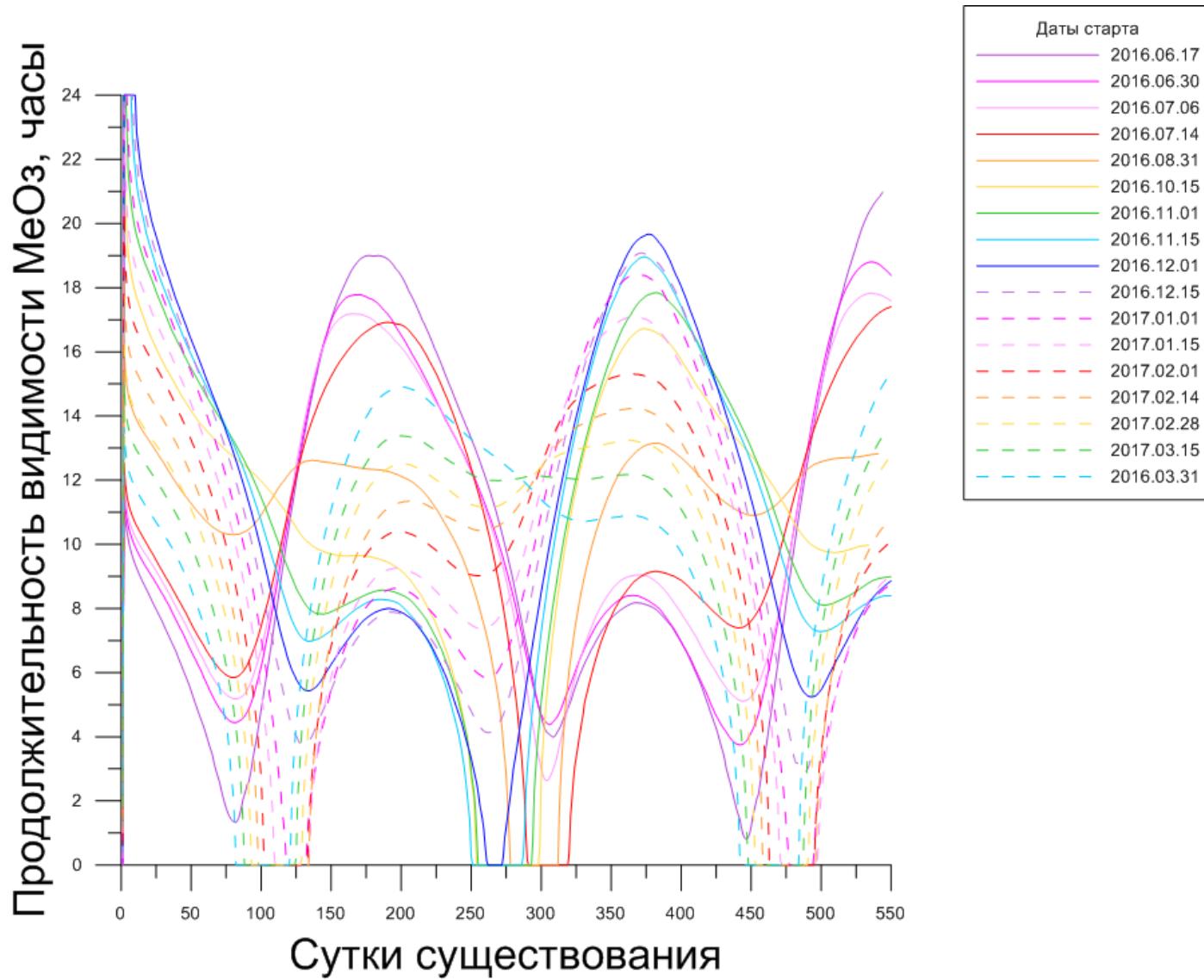
Суточная видимость для разных КИП в течение 550 суток



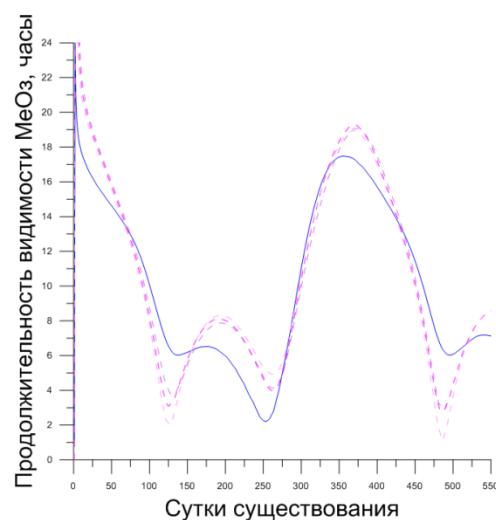
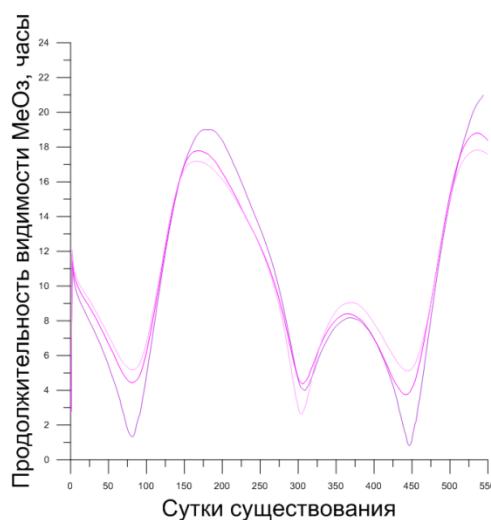
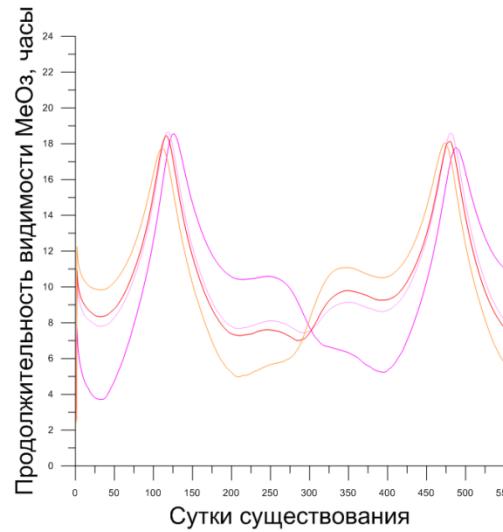
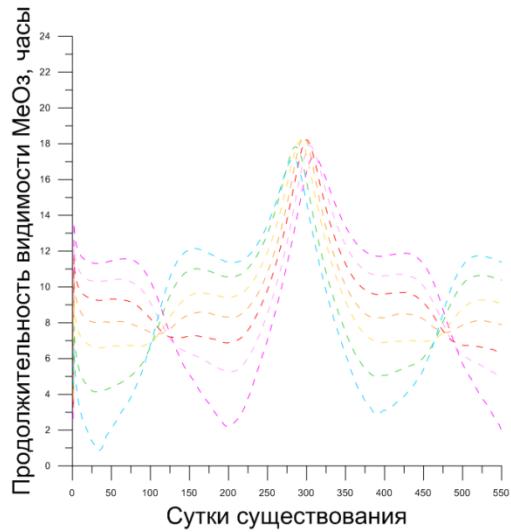
Эволюция суточной видимости с КИП «Медвежьи озёра» для орбит с большим выходом по «-Z» в течение 550 суток



Эволюция суточной видимости с КИП «Медвежьи озёра» для орбит с большим выходом по «+Z» в течение 550 суток

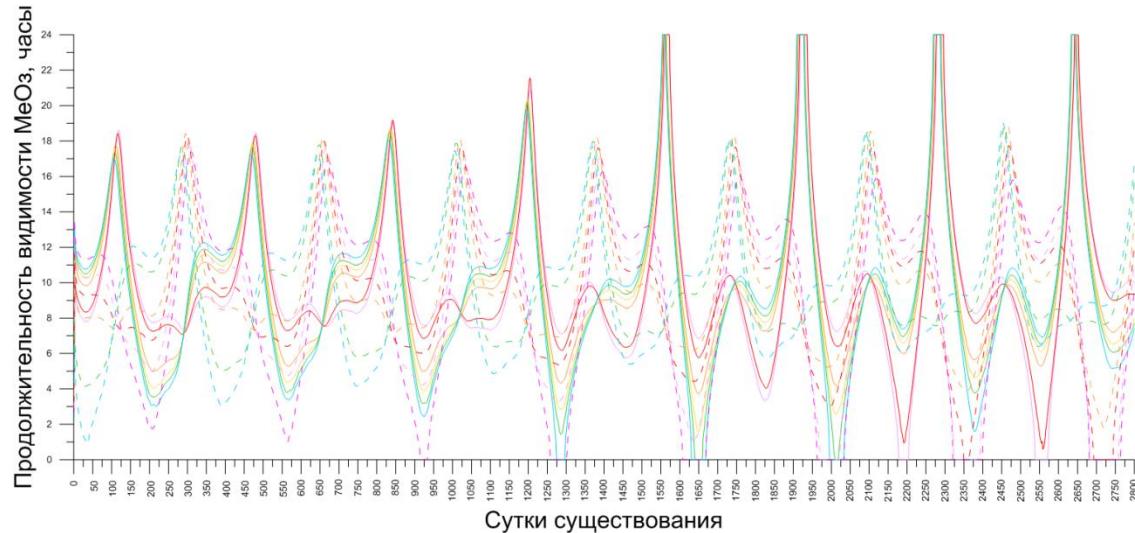


Интервалы дат старта, удовлетворяющие требованию по суточной видимости с КИП «Медвежьи озёра» в течение 550 суток



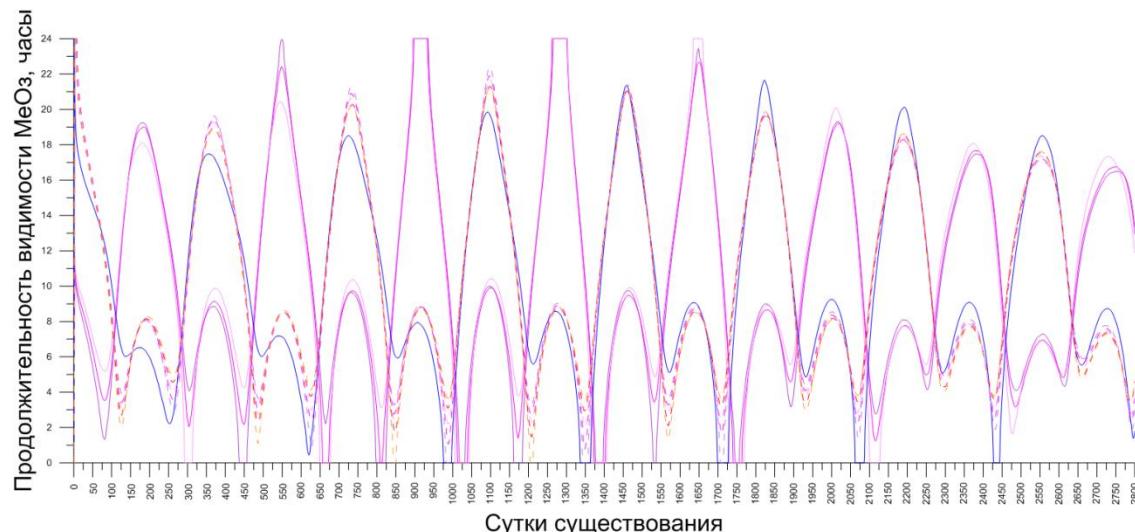
15 января – 14 апреля	1 августа – 10 октября
18 июня – 6 июля	12 декабря – 25 декабря

Интервалы дат старта, удовлетворяющие требованию по суточной видимости с КИП «Медвежьи озёра» в течение 7 лет



Даты старта

- 2016.08.31
- 2016.09.06
- 2016.09.25
- 2016.10.01
- 2016.10.05
- 2016.10.10
- 2017.01.15
- 2017.02.01
- 2017.02.15
- 2017.03.01
- 2017.04.01
- 2017.04.14



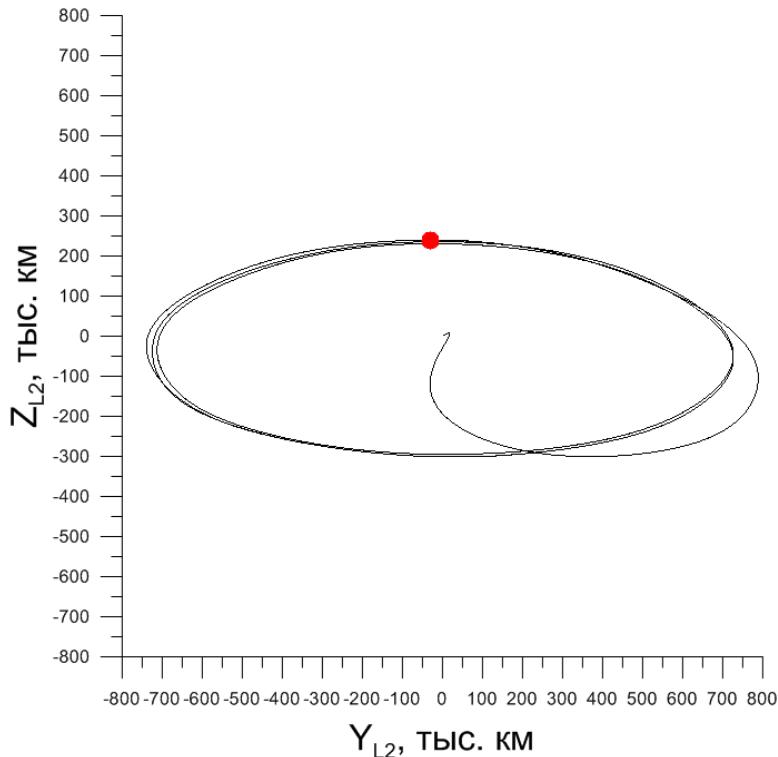
Даты старта

- 2016.06.17
- 2016.06.24
- 2016.07.06
- 2016.12.12
- 2016.12.15
- 2016.12.18
- 2016.12.20
- 2016.12.23
- 2016.12.25

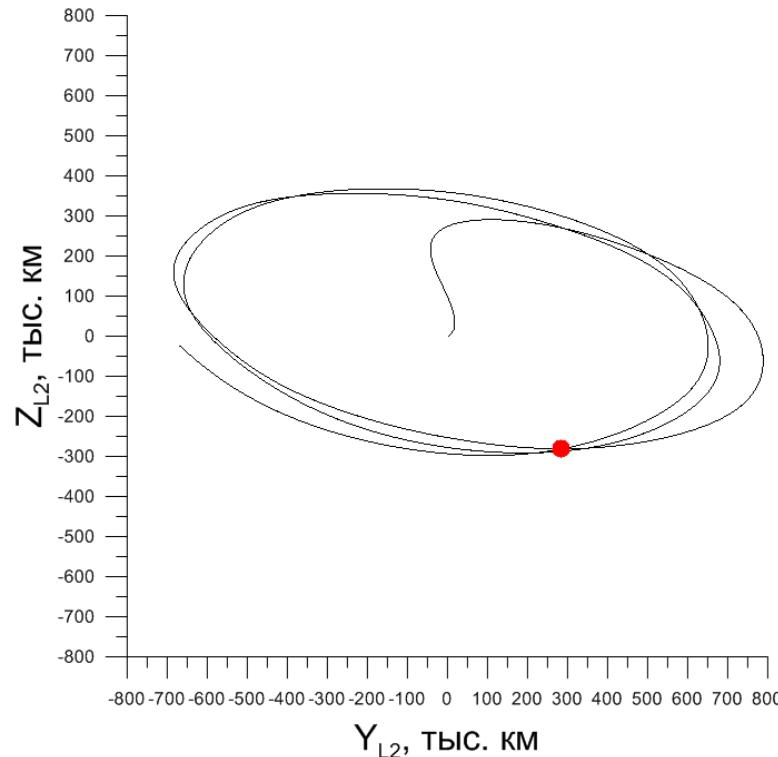
1 марта – 14 апреля	6 сентября – 1 октября
	18 декабря – 24 декабря

Положение КА на орбите в момент прилёта в район L_2

Моментом прилёта в район L_2 будем считать момент достижения максимальной амплитуды по Z_{L_2} после перелёта (обозначен красной точкой).

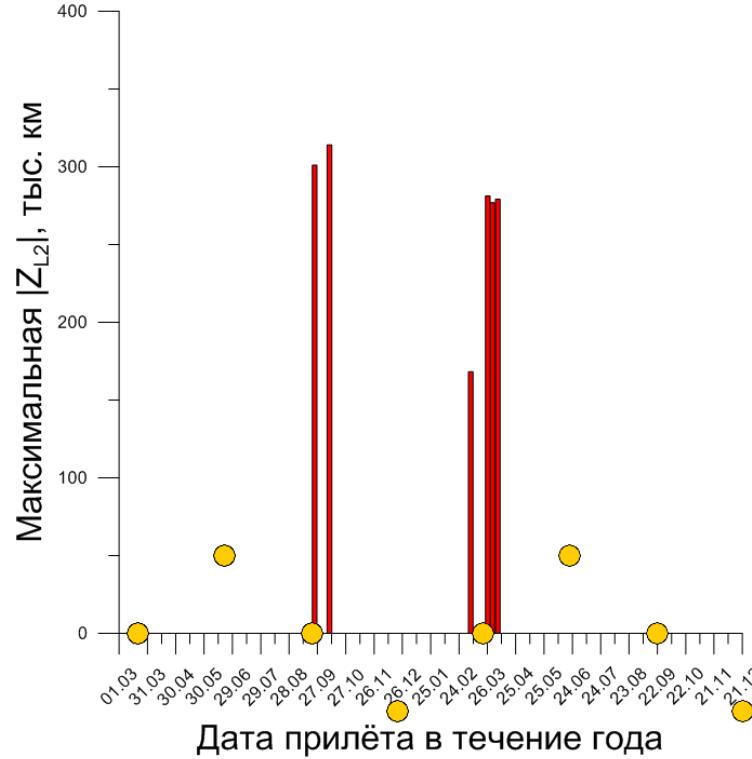
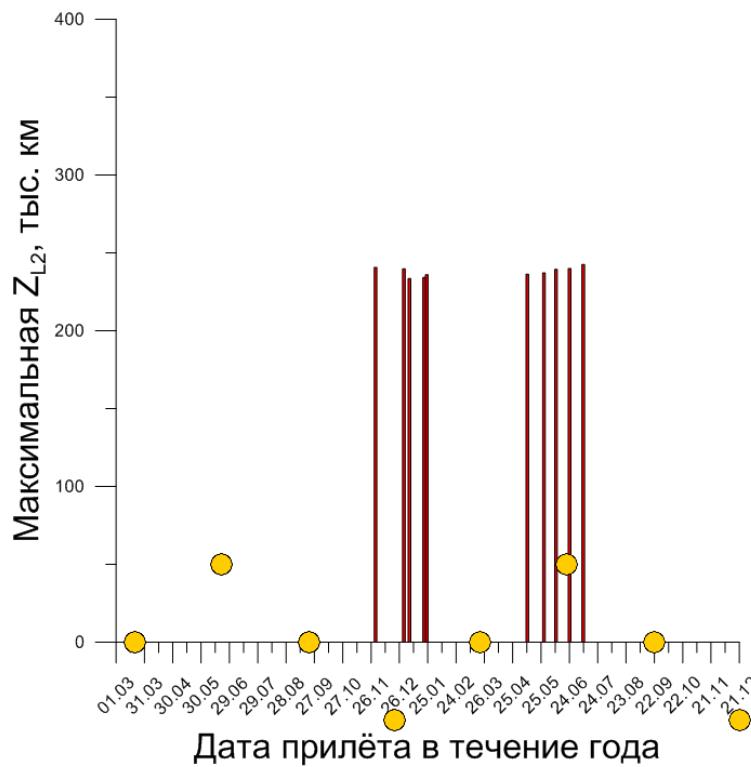


Орбита с большим выходом по «- Z »



Орбита с большим выходом по «+ Z »

Синхронизация даты прилёта в район L_2 с положением Солнца относительно Земли



Даты прилёта для орбит с большим выходом по «-Z» лежат в районе солнцестояний (верхние и нижние круги).

Даты прилёта для орбит с большим выходом по «+Z» лежат в районе дат равноденствий (средние круги).

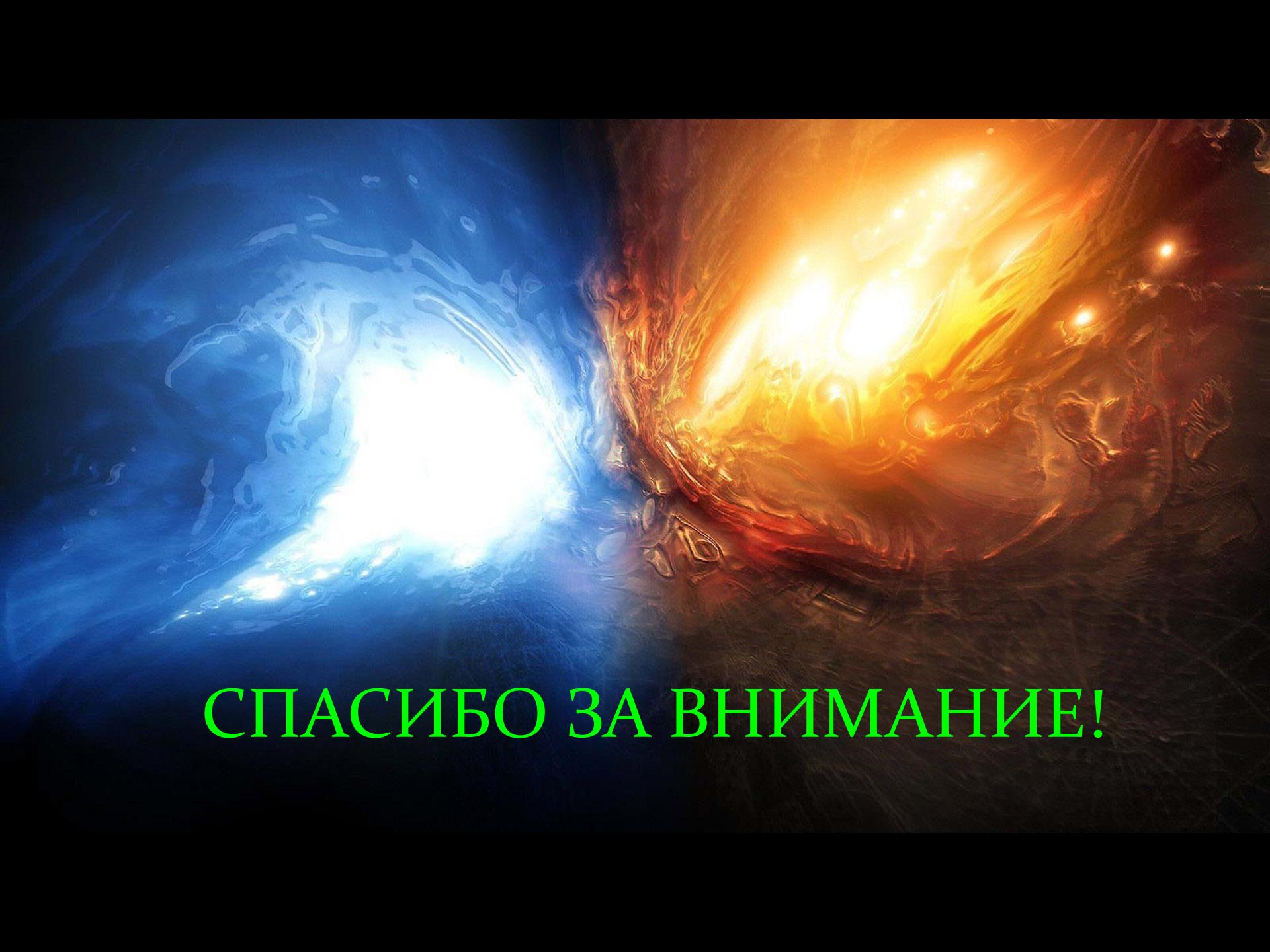
Выводы

Результаты проделанной работы:

- Проведён анализ траекторий перелёта на КПО, позволивший отказаться от вариантов орбит, не обеспечивающих радиовидимость начального участка перелёта с заданных КИП.
- На основе статистического анализа даны рекомендации по отсеиванию вариантов орбит с заведомо коротким сроком существования.
- Определены возможные окна старта КА «Спектр-РГ» в течение года, которые бы обеспечивали ежесуточную видимость с КИП «Медвежьи озёра» в течение всего срока активного существования.
- Несмотря на то, что орбиты с большим выходом по «-Z» кажутся более предпочтительными для обеспечения ежесуточной видимости с КИП «Медвежьи озера», расчеты показали, что при использовании орбит с большим выходом по «+Z» интервал возможных дат старта существенно больше.
- Проведённые исследования позволяют сократить вычисления в 4 раза (а при отказе от орбит с большим выходом по «+Z» – в 8 раз).

Список литературы

- Ильин И.С. , Сазонов В.В., Тучин А.Г. Гало-орбиты в окрестности точки либрации системы Солнце – Земля // Космические исследования, 2014, №3.
- Ильин И.С., Заславский Г.С., Лавренов С.М., Сазонов В.В., Степаньянц В.А., Тучин А.Г., Тучин Д.А., Ярошевский В.С. Баллистическое проектирование траекторий перелёта с орбиты искусственного спутника Земли на гало-орбиту в окрестности точки L_2 системы Солнце – Земля // Космические исследования, 2014, №6
- Лидов М.Л., Ляхова В.А., Тесленко Н.М. Траектории полета Земля – Луна – гало-орбита в окрестности точки L_2 системы Земля – Солнце // Космические исследования – 1992. – т. 30. № 4. – С.435–454.
- Маркеев А.П. Точки либрации в небесной механике и космодинамике. – М.: Наука, 1978. – 312 с.

The background of the image is a dark, abstract space. On the left, a bright blue energy field with swirling patterns and glowing particles forms a circular shape. On the right, a bright orange and yellow energy field with similar swirling patterns and glowing particles forms a circular shape. The two fields are positioned side-by-side, creating a sense of balance. The overall effect is like a celestial event or a powerful energy exchange.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!