

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ СЕРИИ “БОЛЬШИХ” КОРРЕКЦИЙ ТРАЕКТОРИИ ПОЛЕТА КА “СПЕКТР-РГ” ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ЕГО РАДИОВИДИМОСТИ

© 2022 г. Е. А. Михайлов<sup>1</sup>, С. А. Аксенов<sup>2,3</sup>,  
Г. С. Заславский<sup>4</sup>, П. В. Мжельский<sup>1</sup>, А. В. Погодин<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Акционерное общество “Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина”, Химки, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

<sup>4</sup>Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

Поступила в редакцию 10.12.2021 г.

После доработки 28.12.2021 г.; принята к публикации 28.12.2021 г.

Представлена принятая методика расчета серий коррекций рабочей орбиты космической обсерватории “Спектр-РГ” для улучшения условий радиовидимости КА с российских наземных станций. Также описывается альтернативная, более эффективная методика. Проводится сравнение результатов применения обеих методик.

**Ключевые слова:** Спектр-РГ, коллинеарные точки либрации, задача трех тел, изменение параметров квазипериодической орбиты.

**DOI:** 10.31857/S0320010822010065

### ВВЕДЕНИЕ

Рабочей орбитой космической обсерватории “Спектр-РГ” (запуск в 2019 г.) является квазипериодическая орбита (КПО) относительно точки либрации  $L_2$  системы Солнце–Земля. Согласно техническому заданию, срок активного существования космического аппарата (КА) составляет не менее 6.5 лет.

Перенос пуска с номинальной даты старта 21.06.2019 на 13.07.2019 ухудшил условия радиовидимости КА с командно-измерительных пунктов (КИП) из состава наземного комплекса управления (НКУ), что могло привести к потере научных данных, к затруднениям в управлении КА и, следовательно, к снижению надежности миссии в целом. Поэтому было принято решение (осень 2020 г.) о проведении серии так называемых “больших” коррекций рабочей КПО КА. Целью этих коррекций является обеспечение в пределах времени гарантированного активного существования приемлемой минимальной длительности суточного сеанса связи с КА. В связи с этим стала актуальной проблема определения баллистических параметров серии “больших” коррекций

при заданном ограничении сверху на величину характеристической скорости каждой коррекции. В основном решению этой проблемы посвящена настоящая статья.

При выборе параметров коррекций рассматривались два критерия: уменьшение выхода орбиты из плоскости эклиптики в сторону Южного полюса мира и увеличение суммарной минимальной ежесуточной радиовидимости КА с КИП “Уссурийск” в 2022–2023 гг.

Дата проведения коррекции существенно влияет на другие параметры коррекции, а также на приведенные выше критерии. В статье представлены две методики выбора дат “больших” коррекций. Приведены их сравнительные характеристики. Кроме того, для удобства читателя в статье с необходимой подробностью представлена номинальная траектория полета КА и характеристики его наблюдаемости с КИП НКУ.

### НОМИНАЛЬНАЯ ТРАЕКТОРИЯ

Траектория движения КА “Спектр-РГ” представляется в системе координат  $X_{L_2}Y_{L_2}Z_{L_2}$  с центром в точке либрации  $L_2$  системы Солнце–Земля. Ось  $X_{L_2}$  этой системы координат направлена на

\* Электронный адрес: PogodinAV@laspace.ru

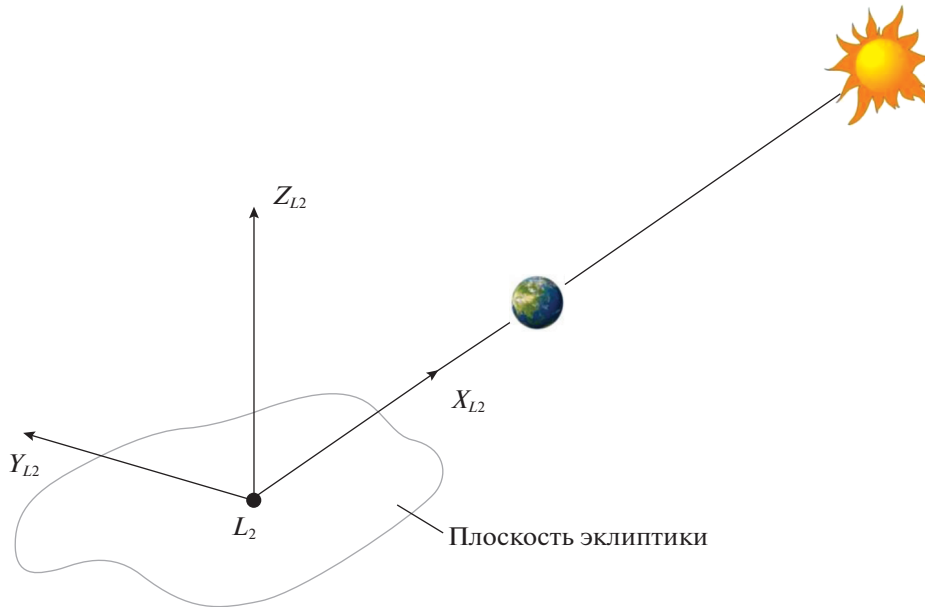


Рис. 1. Система координат  $X_{L_2} Y_{L_2} Z_{L_2}$ .

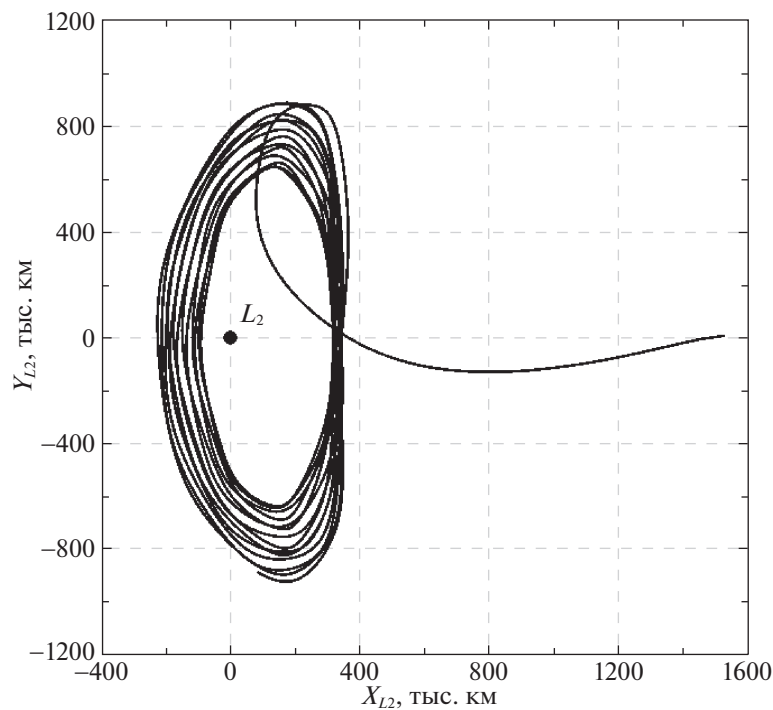


Рис. 2. Номинальная траектория КА "Спектр-РГ" в проекции на плоскость  $X_{L_2} Y_{L_2}$ .

Солнце, ось  $Z_{L_2}$  ортогональна плоскости эклиптики и направлена в сторону Северного полюса мира, а ось  $Y_{L_2}$  дополняет систему до правой (рис. 1).

На рис. 2 и 3 представлены номинальная траектория КА "Спектр-РГ" в окрестности точки  $L_2$  и траектория перелета на нее в проекциях на плоскости  $X_{L_2} Y_{L_2}$  и  $Y_{L_2} Z_{L_2}$ .

Следует отметить, что номинальная траектория

состоит из пассивных участков, между которыми имеются активные участки, где непрерывно работает бортовая двигательная установка. На каждом активном участке двигательная установка создает тягу в заданном для него направлении. Длительность каждого активного участка траектории пренебрежимо мала по сравнению с длительностью следующего за ним пассивного участка траектории.

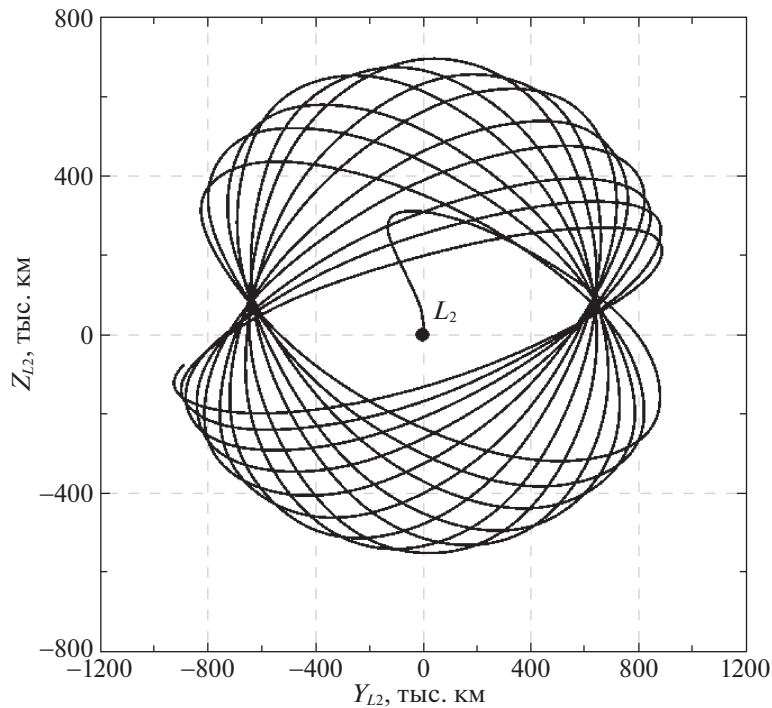


Рис. 3. Номинальная траектория КА “Спектр-РГ” в проекции на плоскость  $Y_{L_2}Z_{L_2}$ .

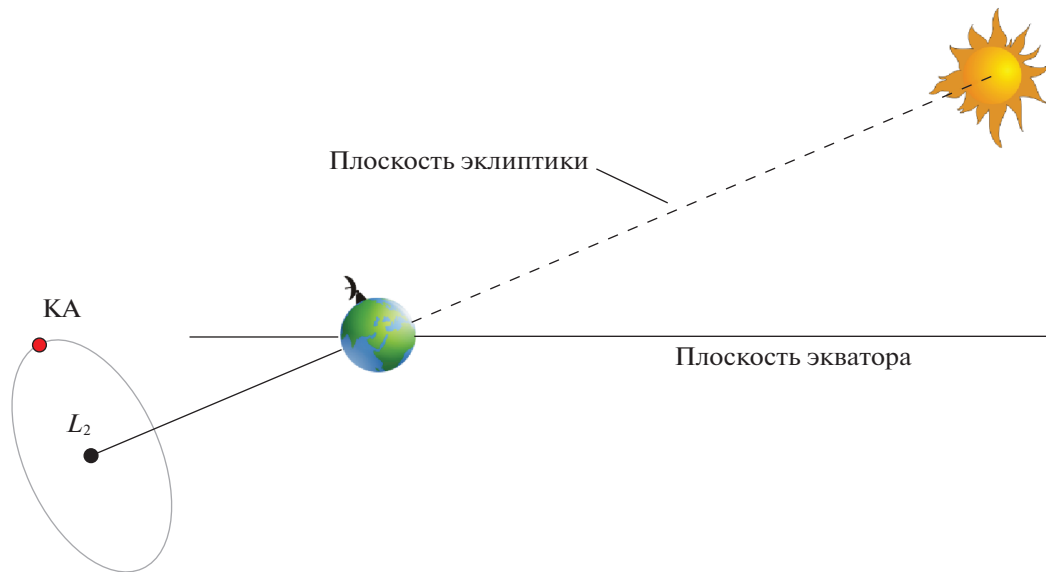


Рис. 4. Положение точки либрации  $L_2$ , КА и Солнца в летнее солнцестояние.

Одним из основных требований к номинальной траектории КА “Спектр-РГ” является обеспечение условий ежесуточной радиовидимости КА с задействованных КИП “Медвежья Озера” и “Уссурийск”, которые располагаются на территории РФ, т.е. в северном полушарии Земли.

Размещение КА непосредственно в точке либрации  $L_2$  нежелательно, поскольку в этом случае он затеняется Землей, что неприемлемо для работы

бортовой аппаратуры. Рабочая КПО КА “Спектр-РГ” строится таким образом, чтобы избежать зоны затенения на протяжении всего срока активного существования. Вследствие неустойчивости точки либрации  $L_2$  (Ляпунов, 1956) длительное пребывание КА на этой орбите обеспечивается регулярным проведением коррекций поддержания (не чаще, чем один раз в 1.5 мес) (Эйсмонт и др., 2020). При этом модуль характеристической скорости коррекции не

превосходит величины около 1.5 м/с (Ильин и др., 2013).

В точке  $L_2$  наихудшие условия радиовидимости с задействованных северных КИП наступают в момент летнего солнцестояния. В это время Солнце достигает максимального выхода из плоскости земного экватора в сторону Северного полюса мира, а точка  $L_2$ , соответственно, — в сторону Южного полюса мира. Точки выбранной КПО КА “Спектр-РГ” лежат как выше, так и ниже плоскости эклиптики. Наилучшим положением КА для его радиовидимости с задействованных КИП во время летнего солнцестояния является крайняя точка в положительном направлении по оси  $Z_{L_2}$  (рис. 4). Поскольку условный период рассматриваемой КПО составляет  $\sim 180$  сут, то в момент зимнего солнцестояния положение КА будет также характеризоваться большим выходом из плоскости эклиптики в положительном направлении по оси  $Z_{L_2}$ .

Следовательно, номинальная траектория КА “Спектр-РГ” выбиралась таким образом, чтобы в моменты летнего и зимнего солнцестояния он находился в крайней точке в положительном направлении по оси  $Z_{L_2}$ .

По направлению большего выхода из плоскости эклиптики КПО можно разделить на два типа: северные орбиты (с большим выходом из плоскости эклиптики в сторону Северного полюса мира) и южные орбиты (с большим выходом в сторону Южного полюса мира) (Мжельский, Михайлов, 2018). На рис. 5 и 6 изображены проекции на плоскость  $Y_{L_2}Z_{L_2}$  траекторий перелета и условно-периодических траекторий полета КА на северных и южных КПО. Красными точками обозначены проекции точек положения КА на 100-е сут от старта, что условно соответствует моментам времени его выхода на КПО в районе точки либрации. Видно, что в эти моменты КА находится близко к крайним точкам по оси  $Z_{L_2}$  в отрицательном и положительном направлениях соответственно. Следовательно, даты старта КА “Спектр-РГ” выбирались таким образом, чтобы выход КА на КПО был близок к летнему или зимнему солнцестоянию.

Поскольку “Медвежья Озера” является самым северным из задействованных КИП и, следовательно, имеет наихудшие условия ежедневной (на интервале 24 ч) радиовидимости, номинальная дата старта КА “Спектр-РГ” выбиралась из условия обеспечения ежедневной радиовидимости с этого КИП в течение всего срока активного существования.

С учетом всего вышесказанного были рассчитаны соответствующие окна старта КА для северных и южных орбит (Мжельский, Михайлов, 2018). Однако по техническим причинам пуск состоялся в

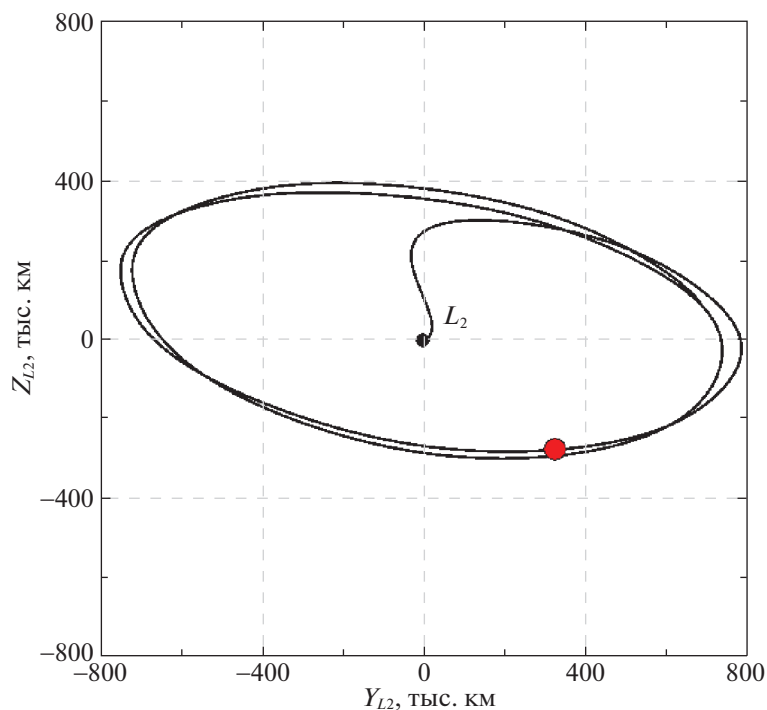
дату, расположенную вне этих рассчитанных окон старта, что привело к ухудшению условий радиовидимости даже для номинальной траектории полета КА в эту дату. На рис. 7 видно, что ежедневная радиовидимость КА “Спектр-РГ” с КИП “Медвежья Озера” имеет разрывы продолжительностью от 20 дней до полутора месяцев, повторяющиеся с периодичностью один раз в год. Кроме того, в 2022–2023 гг. минимальная ежедневная радиовидимость с КИП “Уссурийск” может достигать значений менее 1 ч (по углу места  $7^\circ$ ).

Для штатной работы по имеющейся технологии взаимодействия наземных служб с КА необходимо обеспечить его ежедневную непрерывную радиовидимость (по углу места  $7^\circ$ ) длительностью не менее  $\sim 4$  ч. В этой связи было принято решение о проведении серии так называемых “больших” коррекций орбиты КА “Спектр-РГ”, призванных обеспечить условия радиовидимости КА с КИП “Уссурийск”.

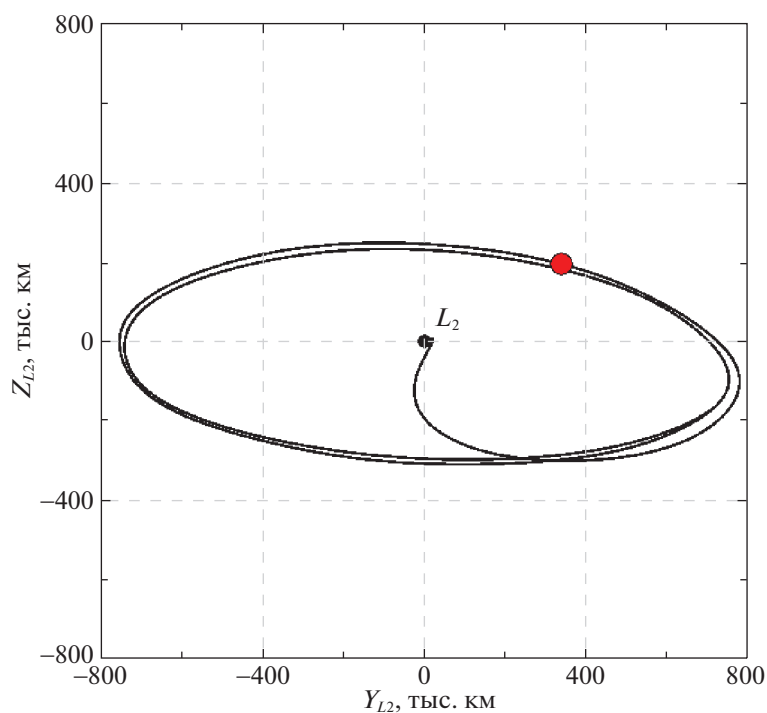
#### ПРИНЯТАЯ МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ СЕРИИ “БОЛЬШИХ” КОРРЕКЦИЙ

Из рис. 4 следует, что наихудшие условия радиовидимости КА с задействованных КИП наступают тогда, когда КА достигает крайней точки своей траектории в сторону Южного полюса мира (в отрицательном направлении по оси  $Z_{L_2}$ ) в момент летнего или зимнего солнцестояния. Следовательно, для улучшения условий радиовидимости необходимо проведение коррекции, уменьшающей выход орбиты из плоскости эклиптики в сторону Южного полюса мира. В связи с имеющим место ограничением на время непрерывной работы двигательной установки, а также с учетом технологии управления КА, рабочая орбита должна корректироваться несколькими включениями двигательной установки. Логично эти включения распределить по витку некоторым оптимальным образом.

По итогам ознакомления с работами (Каналиас Вила, 2007; Каналиас, Масдемонт, 2004; Гомес и др., 2001; Гомес, Маркот, 2005; Хешлер, Кобос, 2002; Ховелл, Хидэй-Джонстон, 1994; Жорба, Масдемонт, 1999; Ричардсон, 1980; Трумэн, Ворфолк, 1996) была выбрана методика, описанная Каналиас Вила (2007, с. 29) и Хешлер, Кобос (2002, с. 123). В данной методике указывается, что оптимальным моментом проведения коррекции по уменьшению амплитуды выхода из плоскости эклиптики является момент пересечения КА плоскости эклиптики. Это условие (учитывая, что период КПО составляет  $\sim 180$  сут) будет выполняться примерно каждые три месяца. При этом импульс следует выдавать в направлении, противоположном составляющей скорости по оси  $Z_{L_2}$



**Рис. 5.** Проекция на плоскость  $Y_{L_2}Z_{L_2}$  траектории перелета и условно-периодической траектории полета КА в окрестности северной КПО.



**Рис. 6.** Проекция на плоскость  $Y_{L_2}Z_{L_2}$  траектории перелета и условно-периодической траектории полета КА в окрестности южной КПО.

в момент проведения коррекции. Соответственно, чем больше будет величина выдаваемых импульсов, тем меньшим будет выход измененной орбиты

КА из плоскости эклиптики, и тем лучше будут условия радиовидимости КА “Спектр-РГ” с КИП “Уссурийск”.

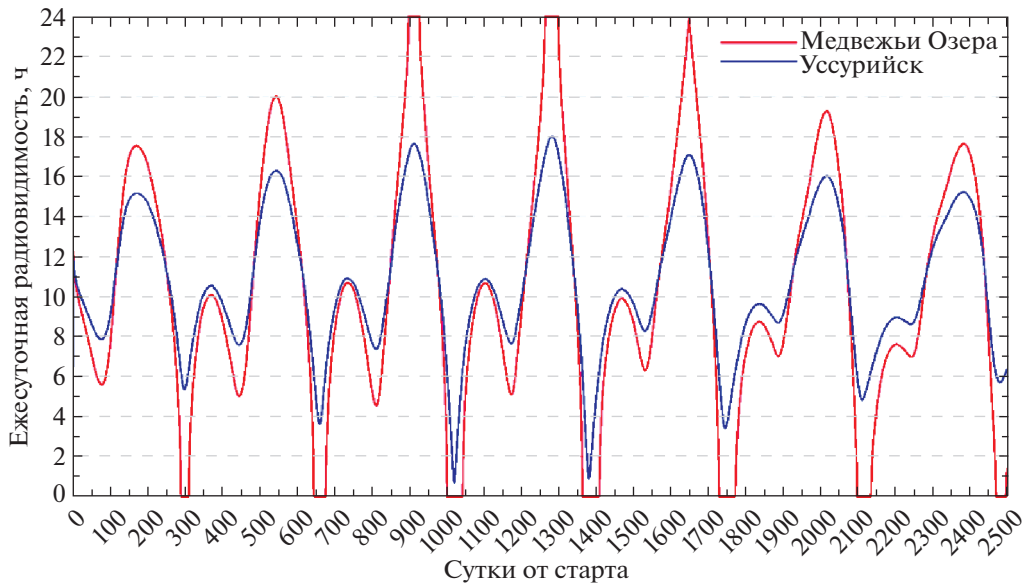


Рис. 7. Продолжительность ежедневной радиовидимости КА "Спектр-РГ" на номинальной КПО с задействованных КИП (по углу места  $7^\circ$ ).

Однако указанная методика в том виде, в котором она описана в литературе, может быть применима только к орбитам Лиссажу в рамках круговой ограниченной задачи трех тел. В действительности КА "Спектр-РГ" при движении испытывает гравитационные воздействия не только от Земли и Солнца, но и от других небесных тел. Кроме того, необходимо учитывать их реальное движение. Также заметное влияние на движение КА оказывает сила светового давления от Солнца. Поэтому предполагаемые приращения скорости в результате исполнения "больших" коррекций должны быть дополнительно уточнены с целью увеличения срока пребывания КА в окрестности точки либрации  $L_2$  после проведения коррекции, что приводит к появлению составляющих импульсов по осям  $X_{L_2}$  и  $Y_{L_2}$ . Таким образом, оптимальный момент проведения коррекций будет располагаться вблизи момента пересечения орбиты плоскости эклиптики, но не совпадать с ним.

В итоге был принят следующий критерий выбора дат проведения серии "больших" коррекций: выход орбиты КА из плоскости эклиптики в сторону Южного полюса мира ( $Z_{L_2}^{\min}$ ) на ближайшем следующем достижении  $Z_{L_2}^{\min}$ . Для оптимальной даты критерий должен быть минимальным. Основным направлением выдачи корректирующего импульса при этом является направление, противоположное составляющей скорости по оси  $Z_{L_2}$ , которое надо дополнительно уточнять.

### СЦЕНАРИЙ ПРОВЕДЕНИЯ СЕРИИ "БОЛЬШИХ" КОРРЕКЦИЙ

Для достижения приемлемых условий радиовидимости КА в 2022–2023 гг. было рассмотрено несколько вариантов проведения серии коррекций по указанной выше методике. При этом величина приращения скорости за счет однократной непрерывной работы двигательной установки была ограничена сверху значением 12 м/с (в связи с ограничением на максимальную продол-

Таблица 1. Выбранный сценарий проведения серии "больших" коррекций

Дата выдачи импульса	Величина импульса, м/с	Основное направление выдачи импульса
05.10.2020	3	$+Z_{L_2}$
23.11.2020	6	$-Z_{L_2}$
28.02.2021	6	$+Z_{L_2}$
22.05.2021	6	$-Z_{L_2}$
02.09.2021	6	$+Z_{L_2}$
23.11.2021	6	$-Z_{L_2}$
02.03.2022	6	$+Z_{L_2}$
22.05.2022	6	$-Z_{L_2}$
02.09.2022	6	$+Z_{L_2}$
23.11.2022	6	$-Z_{L_2}$
02.03.2023	6	$+Z_{L_2}$

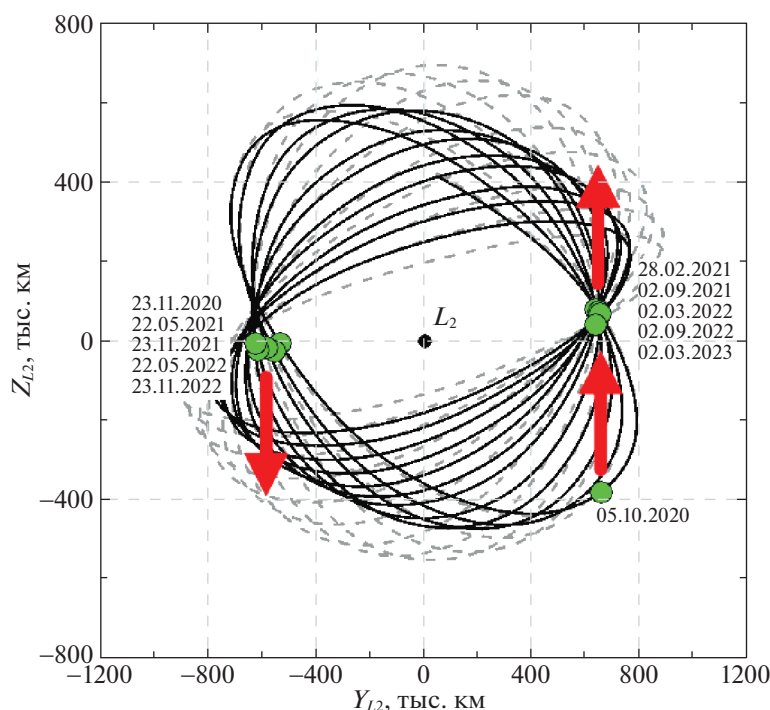


Рис. 8. Номинальная и измененная КПО КА “Спектр-РГ” в проекции на плоскость  $Y_{L_2}Z_{L_2}$  для выбранного сценария.

жительность непрерывной работы двигательной установки). По итогам моделирования решением Главной оперативной группы управления (ГОГУ) космическим комплексом (КК) “Спектр-РГ” по согласованию с ИКИ РАН и Германским центром авиации и космонавтики (DLR) был выбран и принят к исполнению следующий сценарий проведения серии “больших” коррекций, приведенный в табл. 1. Величина характеристической скорости была ограничена значением 6 м/с. В этой таблице и далее в статье результат работы двигательной установки моделируется мгновенным приращением (импульсом) скорости КА в момент ее включения, называемый моментом времени выдачи импульса.

Отметим, что реализованная коррекция 05.10.2020 является тестовой. Она была проведена в неоптимальный (с точки зрения указанной методики) момент для определения влияния работы двигательной установки на детекторы и оптические элементы телескопов “eROSITA” и “ART-XC”, входящих в состав КА “Спектр-РГ”.

Приведенные в таблице даты являются предварительными и уточняются при подготовке к очередной коррекции.

Таким образом, оценка суммарных затрат характеристической скорости для выбранного сценария серии “больших” коррекций составляет  $\sim 63$  м/с.

### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОВЕДЕНИЯ СЕРИИ “БОЛЬШИХ” КОРРЕКЦИЙ

На рис. 8 представлена КПО КА “Спектр-РГ” до конца заданного срока активного существования, получаемая в результате моделирования выбранного сценария проведения “больших” коррекций. Серой пунктирной линией показана номинальная КПО КА “Спектр-РГ”, а сплошной черной линией — получаемая КПО. Дата начала построения обеих орбит — 05.08.2020. Зелеными точками обозначены моменты приложения “больших” импульсов, а красными стрелками — основные направления их выдачи (по или против оси  $Z_{L_2}$ ).

Проведенные расчеты показали, что оптимальные моменты выдачи корректирующих импульсов по указанной методике действительно расположены близко к моменту пересечения КА плоскости эклиптики, однако, ввиду эволюции формы орбиты, несколько смещены относительно него (см. рис. 8).

На рис. 8 видно, что измененная КПО медленнее приближается к линии Солнце–Земля, чем номинальная КПО. Следовательно, КА, находясь на такой орбите, будет иметь меньшую вероятность попадания в тень от Земли или Луны при увеличении срока активного существования.

На рис. 9 представлена ежесуточная радиовидимость КА “Спектр-РГ” с задействованных

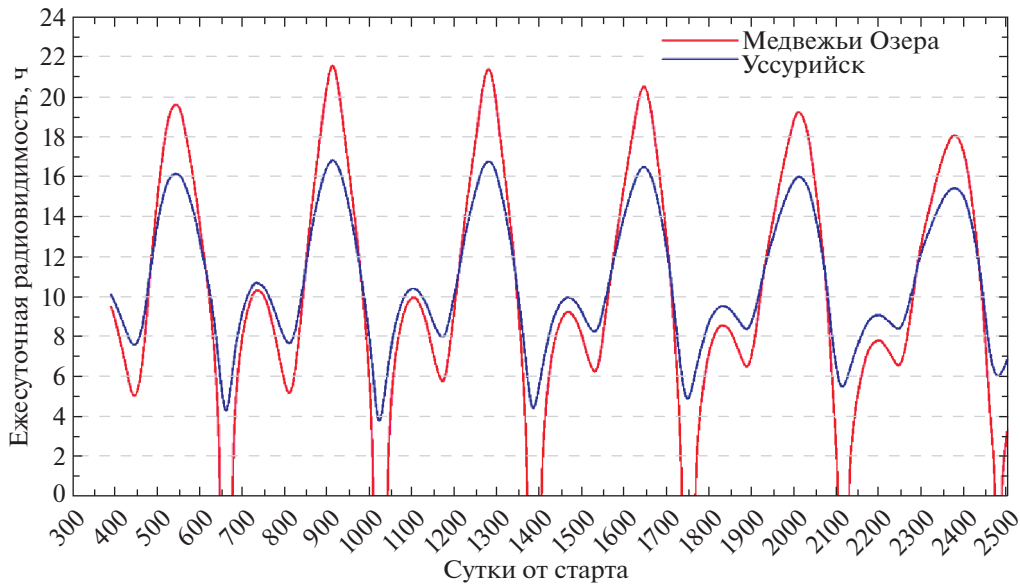


Рис. 9. Продолжительность ежесуточной радиовидимости КА "Спектр-РГ" на измененной КПО по выбранному сценарию (по углу места  $7^\circ$ ).

КИП, находящегося на измененной по выбранному сценарию КПО.

Из рис. 7 и 9 следует, что в результате проведения серии "больших" коррекций минимальная ежесуточная радиовидимость с КИП "Уссурийск" увеличилась и составила  $\sim 4$  ч. Это удовлетворяет необходимым требованиям НКУ для обеспечения штатной работы КА "Спектр-РГ".

К моменту времени написания статьи в соответствие указанному сценарию успешно исполнены тестовая коррекция 05.10.2020 (3 м/с) и пять "больших" коррекций 23.11.2020, 28.02.2021, 23.05.2021, 06.09.2021 и 24.11.2021 (6 м/с), а также получена оценка влияния струй двигательной установки на научную аппаратуру (негативных эффектов не обнаружено).

#### АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ КРИТЕРИЙ ВЫБОРА ДАТ ПРОВЕДЕНИЯ "БОЛЬШИХ" КОРРЕКЦИЙ

В процессе реализации принятой к исполнению схемы проведения серии "больших" коррекций была разработана альтернативная методика, позволяющая дополнительно улучшить условия радиовидимости КА "Спектр-РГ".

Как видно на рис. 7, наихудшие условия радиовидимости с КИП "Уссурийск" наступают примерно на 1020-е и 1380-е сут от старта, что соответствует концу апреля в 2022 и в 2023 гг. Коррекции орбиты необходимо проводить таким образом, чтобы максимизировать ежесуточную радиовидимость с КИП "Уссурийск" в эти периоды. Ежесуточные

радиовидимости в 2022–2023 гг. взаимосвязаны, поэтому был рассмотрен критерий выбора дат проведения коррекций, альтернативный использованному ранее (см. выше) — величина суммарной минимальной ежесуточной радиовидимости КА с КИП "Уссурийск" в 2022–2023 гг. Для оптимальной даты критерий (обозначен как S) должен быть максимальным.

Была исследована связь между датой проведения коррекции (т.е. положением на орбите) и непосредственно величиной S. Для исследования была подготовлена КПО, гарантированно не покидающая окрестность точки либрации  $L_2$  в течение заданного интервала времени. В качестве хорошего приближения к такой орбите использовался фактический вектор состояния после проведения "большой" коррекции 06.09.2021 с откорректированным вектором скорости. Это было сделано для чистоты эксперимента, так как уход КА под действием возмущений на неустойчивое многообразие траекторий мог повлиять на его результат.

Исследовалось влияние даты и направления выдачи корректирующего импульса величиной 6 м/с на величину S. Рассматривались моменты проведения коррекций орбиты с шагом 5 сут, начиная с 50 сут от 06.09.2021, обозначенные на рис. 10 точками. Пунктирной линией обозначена траектория движения КА до первой рассматриваемой точки.

Для каждой рассмотренной даты были найдены направления выдачи корректирующего импульса, которые обеспечивают длительное пребывание КА в окрестности точки  $L_2$  (не менее 680 сут). Направление выдачи импульса задавалось углами прямого



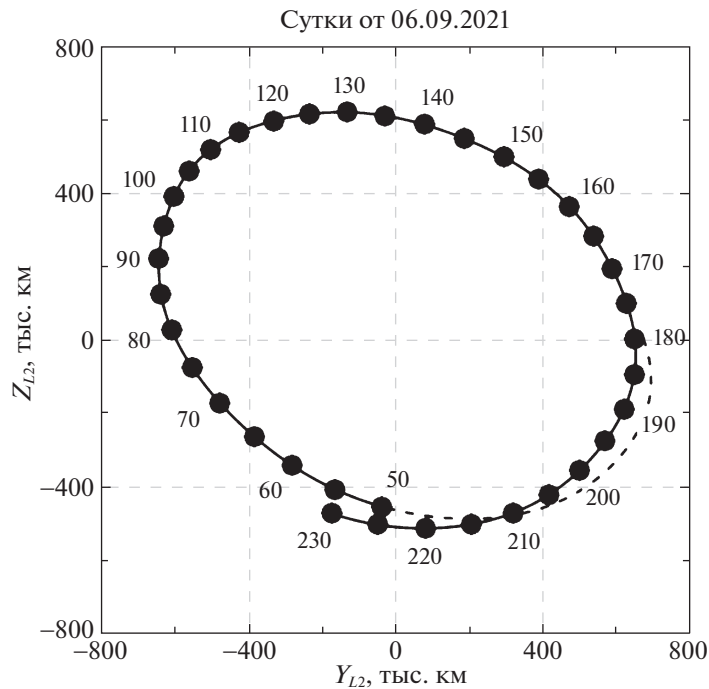


Рис. 10. Рассматриваемые моменты проведения коррекции на орбите в проекции на плоскость  $Y_{L_2}Z_{L_2}$ .

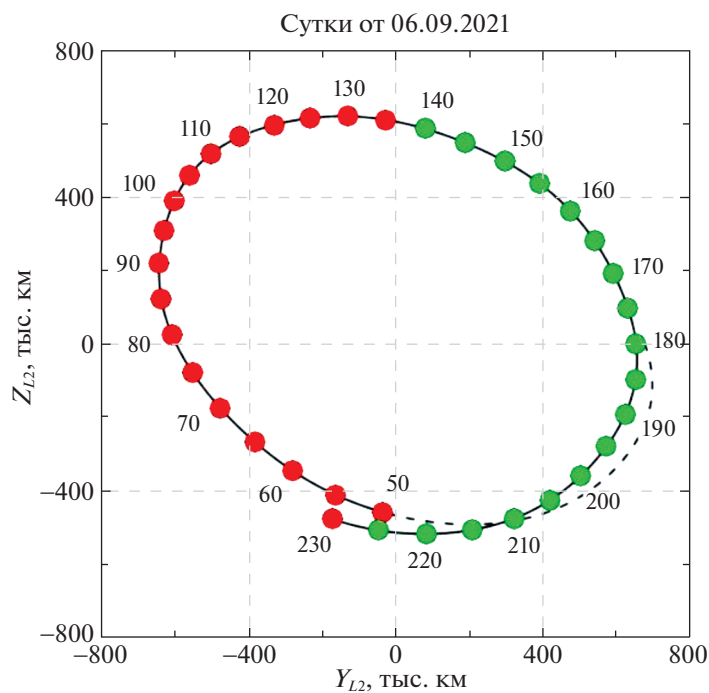


Рис. 11. Две группы направлений выдачи корректирующего импульса.

восхождения и склонения в системе координат  $X_{L_2}Y_{L_2}Z_{L_2}$ . Прямое восхождение отсчитывалось в плоскости эклиптики от оси  $X_{L_2}$ , а склонение — от плоскости эклиптики в сторону Северного полюса мира (положительное направление) и Южного полюса мира (отрицательное направление). Для

заданной величины прямого восхождения, которая перебиралась с шагом  $5^\circ$ , величина склонения определялась методом ограничивающих плоскостей, подробно описанном в (Аксенов, Бобер, 2018).

Анализ основного направления выдачи импуль-

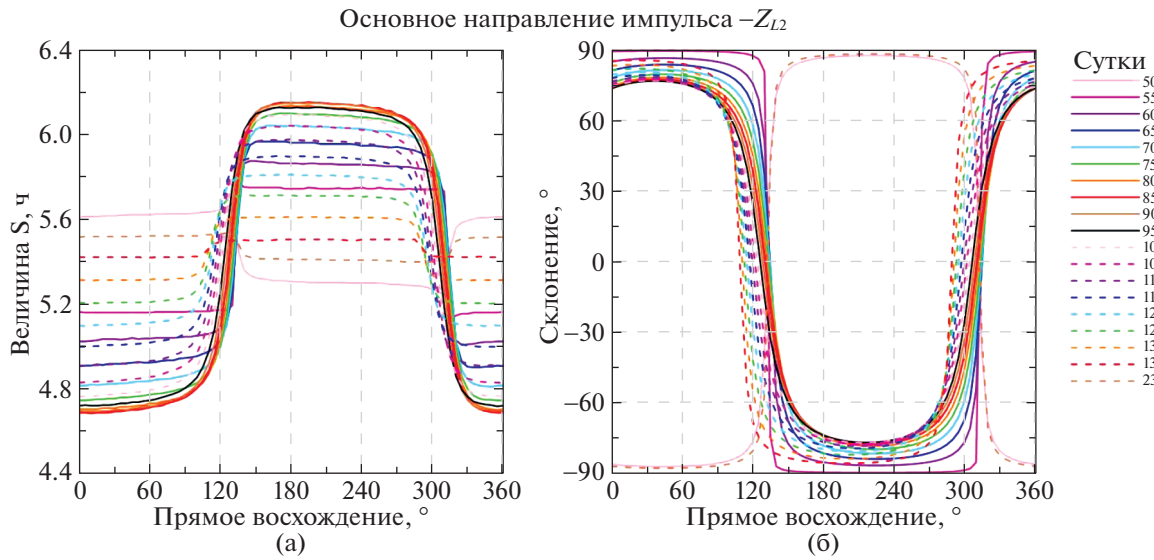


Рис. 12. Величина  $S$  и соответствующее наилучшее направление импульса с основной частью, направленной по  $-Z_{L_2}$ .

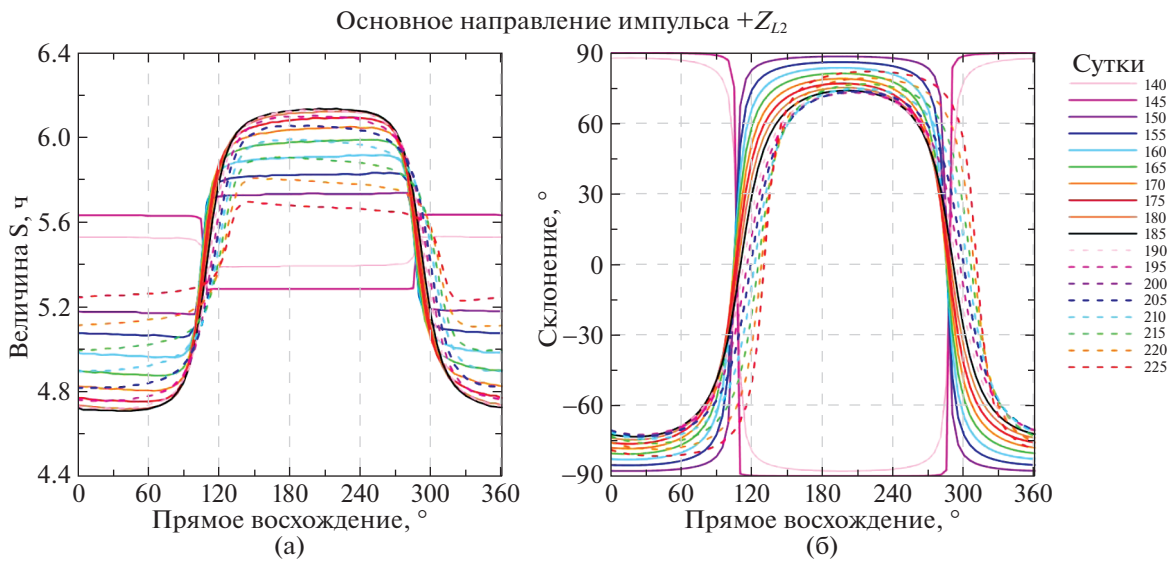


Рис. 13. Величина  $S$  и соответствующее наилучшее направление импульса с основной частью, направленной по  $+Z_{L_2}$ .

са показал, что он противоположен составляющей скорости по оси  $Z_{L_2}$ , как было принято в реализуемом на данный момент сценарии проведения серии “больших” коррекций. Исходя из этого, рассмотренные даты были разбиты на две группы: с основным направлением выдачи импульса по  $+Z_{L_2}$  (на рис. 11 обозначены зеленым) и по  $-Z_{L_2}$  (обозначены красным).

На рис. 11 видно, что изменение основного направления выдачи происходит не в крайних точках орбиты по оси  $Z_{L_2}$ , но близко к ним.

Для каждого найденного направления была рассчитана величина  $S$ . На рис. 12а и 13а представлена величина  $S$ , а на рис. 12б и 13б — найденные направления для соответствующих рассматриваемых моментов выдачи импульса.

Из представленных графиков можно сделать следующие выводы:

- наилучшие даты выдачи импульсов достигаются на 85-е или 185-е сут (30.11.2021 и 10.03.2022 соответственно), которые, как

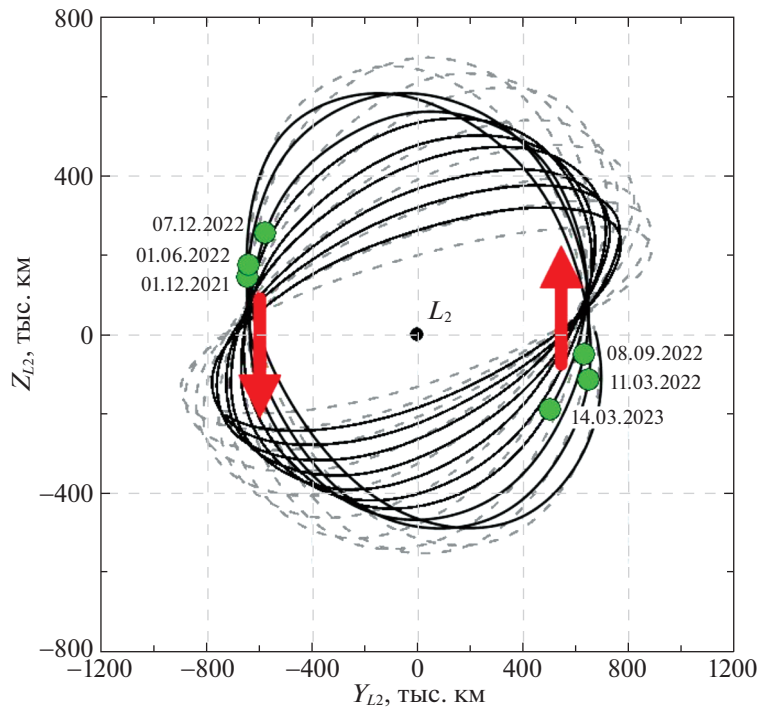


Рис. 14. Номинальная и измененная по альтернативной методике КПО КА “Спектр-РГ” в проекции на плоскость  $Y_{L_2}Z_{L_2}$ .

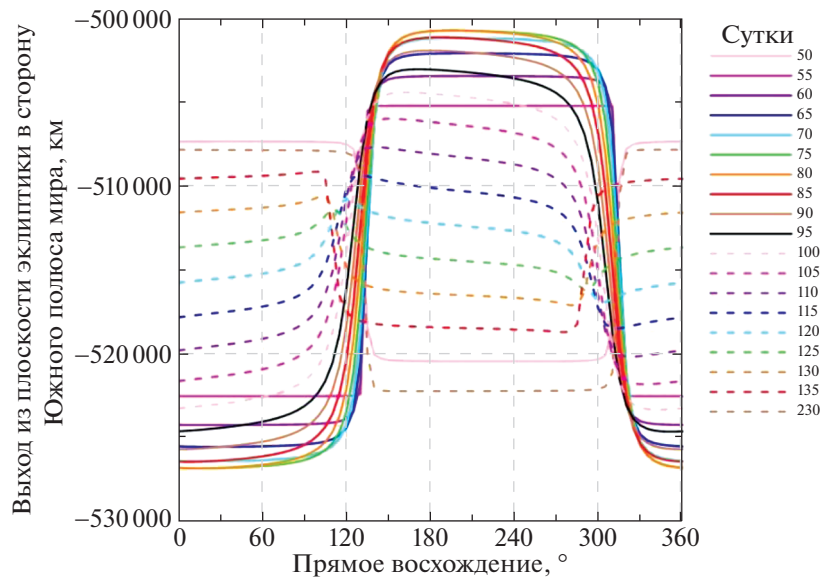
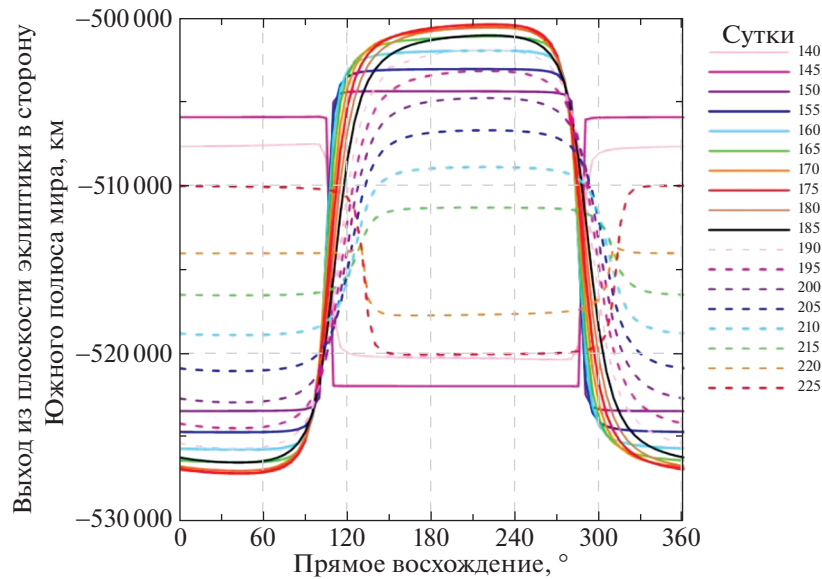


Рис. 15. Выход орбиты из плоскости эклиптики в сторону Южного полюса мира, основное направление выдачи импульса  $-Z_{L_2}$ .

- видно из рис. 10 и 11, расположены после пересечения орбитой КА плоскости эклиптики;
- смещение даты проведения коррекции в окрестности наилучшей даты не приводит к сильному изменению величины  $S$ ;

- оптимальное направление выдачи импульса в наилучшую дату не соответствует направлению выдачи импульса, принятому в реализуемом на данный момент сценарии (по/против направления оси  $Z_{L_2}$ , что соответствует склонению  $90^\circ$  и  $-90^\circ$ ), и может быть отклонено от него более чем на



**Рис. 16.** Выход орбиты из плоскости эклиптики в сторону Южного полюса мира, основное направление выдачи импульса  $+Z_{L_2}$ .

15°. Следовательно, проекция прикладываемого импульса на плоскость эклиптики будет больше, чем в реализуемом на данный момент сценарии, что увеличивает влияние ошибок выдачи импульса на устойчивость орбиты;

- угол прямого восхождения для соседних рассматриваемых дат может изменяться на 180°, хотя основное направление выдачи импульса остается прежним.

В соответствии с приведенными выводами, для всего срока активного существования была рассчитана серия “больших” коррекций по альтернативной методике (см. рис. 14: зелеными точками обозначены моменты приложения импульсов, а красными стрелками — основные направления их выдачи).

Видно, что точки проведения “больших” коррекций, рассчитанные по альтернативной методике, могут располагаться достаточно далеко от точек пересечения орбитой плоскости эклиптики.

Сравним две методики с точки зрения критерия реализуемого на данный момент сценария, а именно, уменьшения выхода орбиты из плоскости эклиптики в сторону Южного полюса мира.

Для обеих рассмотренных выше групп был рассчитан выход орбиты из плоскости эклиптики в сторону Южного полюса мира после проведения коррекции. Результаты представлены на соответствующих рис. 15 и 16.

Наименьший выход орбиты из плоскости эклиптики в сторону Южного полюса мира достигается при проведении коррекции на 80-е или на 175-е сут (25.11.2021 и 28.02.2022 соответственно), что соответствует критерию реализуемого на данный момент сценария, но не совпадает с наилучшими датами выдачи импульсов по альтернативному критерию (85-е или 185-е сут).

Результаты сравнения ежесуточных радиовидимостей КА с КИП “Уссурийск” на орбитах, полученных путем проведения серии “больших” коррекций по принятому и по альтернативному критериям, представлены на рис. 17а. На рис. 17б показаны интервалы времени в 2022–2023 гг. соответственно, в которые достигаются минимумы ежесуточной радиовидимости КА с КИП “Уссурийск”.

Из рис. 17б следует, что использование альтернативного критерия приводит к увеличению радиовидимости КА с КИП “Уссурийск” на 2.4 мин в точке минимальной радиовидимости в 2022 г. и на 4.2 мин — в 2023 г. Эти минуты особенно важны при возникновении нештатных ситуаций во время проведения сеансов управления КА.

Проведенные исследования показали, что методика, основанная на альтернативном критерии проведения серии “больших” коррекций, приводит к лучшим результатам решения поставленной задачи, чем методика, принятая на данный момент. Новая методика рекомендуется к использованию при расчете дальнейших “больших” коррекций из серии.

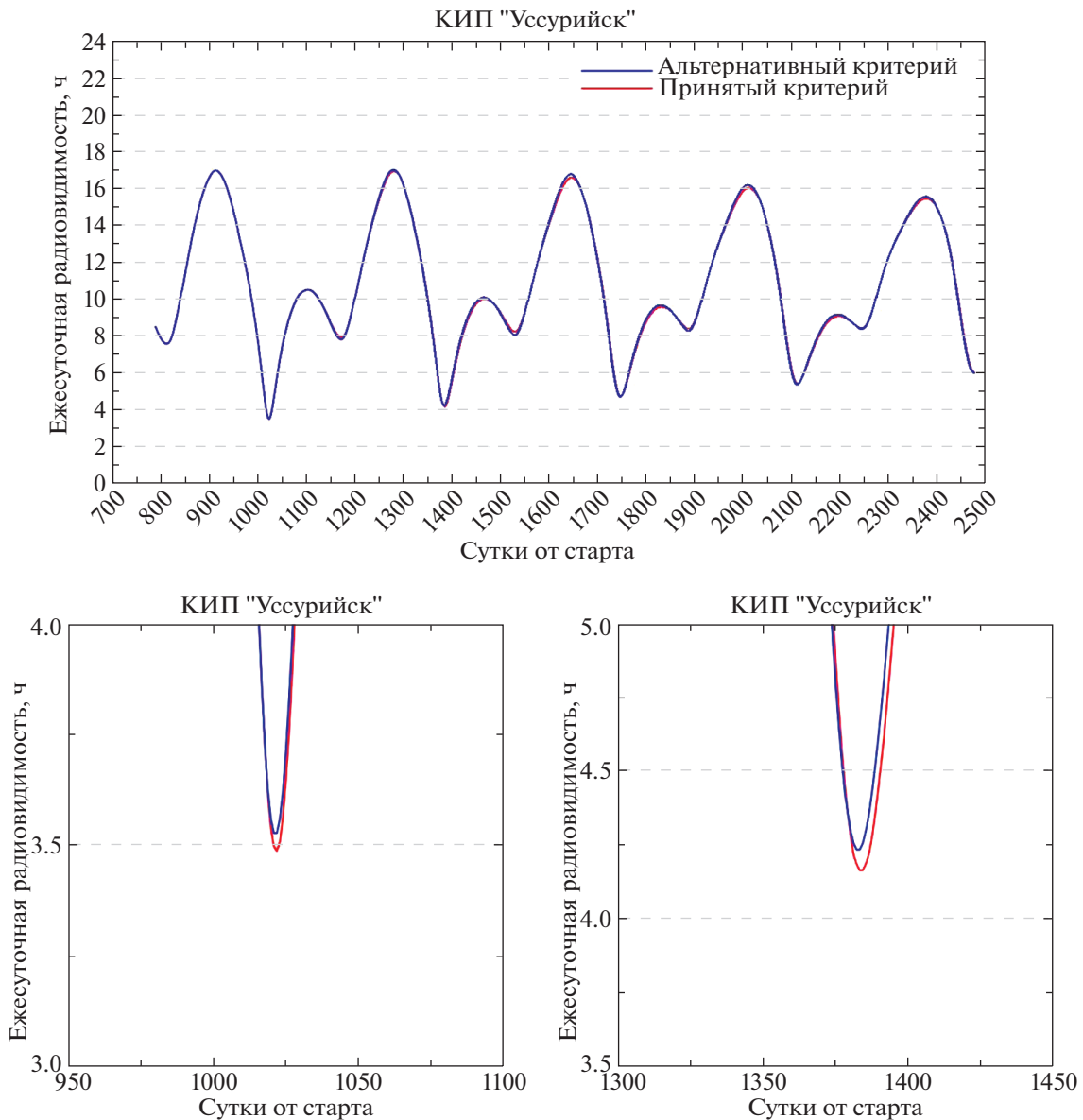


Рис. 17. Сравнение ежесуточных радиовидимостей КА “Спектр-РГ” с КИП “Уссурийск” для двух вариантов орбит (по углу места  $7^\circ$ ).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выбрана и реализована методика по уменьшению амплитуды выхода КПО КА “Спектр-РГ” из плоскости эклиптики, которая приводит к улучшению условий радиовидимости КА с КИП “Уссурийск” в 2022–2023 гг. С помощью реализованной методики было проведено моделирование и выбран сценарий проведения серии “больших” коррекций.

По согласованию с ИКИ РАН и DLR решением ГОГУ КК “Спектр-РГ” выбранный сценарий был принят к исполнению.

Реализованная методика успешно применяется на практике.

Был рассмотрен альтернативный критерий выбора дат проведения “больших” коррекций. Проведенное моделирование показало, что условия радиовидимости КА с задействованных КИП в этом случае улучшаются относительно принятого сценария.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксенов С.А., Бобер С.А., Космич. исслед. **56**, 160 (2018); doi: 10.7868/S0023420618020097.
2. Ильин И.С., Заславский Г.С., Лавренов С.М., Сазонов В.В., Степаньянц В.А., Тучин А.Г., Тучин Д.А., Ярошевский В.С., Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН № 6 (2013).

3. Ляпунов А.М., *Общая задача об устойчивости движения* (Собр. соч., т. 2, М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1956).
4. Мжельский П.В., Михайлов Е.А., Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН № 9 (2018); doi: 10.20948/prepr-2018-9.
5. Каналиас Вила (E. Canalias Vila), *PhD thesis* (Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain, 2007); [https://www.comet-cnes.fr/resource-access/ECanalias\\_0.pdf](https://www.comet-cnes.fr/resource-access/ECanalias_0.pdf)
6. Каналиас, Масдемонт (E. Canalias and J.J. Masdemont), *Eclipse Avoidance for Lissajous Orbits Using Invariant Manifolds* (Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain, 2004); doi: 10.2514/6.IAC-04-A.6.07.
7. Эйсмонт Н.А., Коваленко И.Д., Назаров В.Н. и др., Письма в Астрон. журн. **46**, 292 (2020) [N.A. Eismont, I.D. Kovalenko, V.N. Nazarov, R.R. Nazirov, F.V. Korotkov, A.V. Pogodin, P.V. Mzhelskii, E.A. Mikhailov, A.V. Ditrikh, and A.I. Tregubov, *Astron. Lett.* **46**, 263 (2020)].
8. Гомес и др. (G. Gómez, J. Llibre, R. Martínez, C. Simó), *Dynamics and Mission Design Near Libration Points. V. 1. (Fundamentals: The Case of Collinear Libration Points*, Singapore, et al.: World Sci. Publ. Co., 2001); URL: [https://www.researchgate.net/publication/265900393\\_Dynamics\\_and\\_mission\\_design\\_near\\_libration\\_points\\_Vol\\_1\\_Fundamentals\\_The\\_case\\_of\\_collinear\\_libration\\_points/link/54bfd4f0cf28a63249fd8a2/download](https://www.researchgate.net/publication/265900393_Dynamics_and_mission_design_near_libration_points_Vol_1_Fundamentals_The_case_of_collinear_libration_points/link/54bfd4f0cf28a63249fd8a2/download)
9. Гомес, Маркот (G. Gómez and M. Marcote), AAS/AIAA Astrodynamics Specialists Conf. (7–11 August 2005, Lake Tahoe, California, USA, 2005); URL: <https://www.researchgate.net/publication/216587225>
10. Хешлер, Кобос (M. Hechler and J. Cobos), *Libration Point Orbits and Applications* (Proceed. Conf. Aiguablava, Spain, 10–14 June 2002, Ed. G. Gómez, M.W.-Y. Lo, J.J. Masdemont, 2002), p. 115–135.
11. Ховелл, Хидэй-Джонстон (K.C. Howell and L.A. Hiday-Johnston), *Acta Astronautica* **32**, 245 (1994).
12. Жорба, Масдемонт (A. Jorba and J. Masdemont), *Phys. D Nonlin. Phenomena* **132**, 189 (1999); doi: 10.1016/S0167-2789(99)00042-1.
13. Ричардсон (D.L. Richardson), *Celestial Mechan.* **22**, 241 (1980); doi: 10.1007/BF01229511.
14. Трумэн, Ворфолк (R. Thrumman and P.A. Worfolk), *The geometry of halo orbits in the circular restricted three-body problem* (University of Minnesota, Minneapolis, 1996); <http://www.cds.caltech.edu/archive/help/uploads/wiki/files/39/thurman-worfolk-1996.pdf>