

УДК 520.876

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СКАНИРОВАНИЯ НЕБА В КОСМИЧЕСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ “ЛИРА-Б”

© 2020 г. С. В. Жмайлов^{1, *}, М. Е. Прохоров²

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, Москва, Россия

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва, Россия

* E-mail: zhmajlovsemen@yandex.ru

Поступила в редакцию 01.09.2019 г.

После доработки 15.10.2019 г.

Принята к публикации 22.10.2019 г.

Космический эксперимент (КЭ) “Ли́ра-Б” – высокоточный многоцветный многократный фотометрический обзор звезд и звездообразных объектов всего неба. Эксперимент будет проводиться с борта российского сегмента Международной космической станции (МКС). Для этого на борту (точнее за бортом) МКС будет установлен 0.5-м телескоп, который будет наблюдать звезды в сканирующем режиме. КЭ “Ли́ра-Б” включен в программу научных экспериментов на МКС достаточно давно. В момент начала разработки КЭ считалось, что МКС будет существовать “вечно”, и на проведение эксперимента будет выделено время, необходимое для его полноценного проведения. Однако сегодня ситуация изменилась. Возможно, в 2025 г. МКС прекратит существование либо как космическая станция в целом, либо в том виде, в каком она сейчас существует. Отсюда возникает задача выполнить весь объем наблюдений в максимально короткий срок, т.е. отыскать оптимальную стратегию сканирования неба, которая обеспечила бы максимальную длительность наблюдений. Кроме того, в работе рассмотрены два связанных вопроса: с какой плотностью будут распределены наблюдения по небу и сколько раз на последовательных орбитальных витках будет наблюдаться точка на небе, попавшая в поле зрения телескопа “Ли́ра-Б”. Этот вопрос важен для исследования переменных звезд, для определения орбит и периодов осевого вращения астероидов, а также для обеспечения заданной точности фотометрии по всему небу.

DOI: 10.31857/S0004629920010107

1. ВВЕДЕНИЕ

1.1. Общие сведения о космическом эксперименте

“Ли́ра-Б” – фотометрический космический эксперимент (КЭ), который будет проводиться на МКС. Основная задача КЭ “Ли́ра-Б” – проведение высокоточных многоцветных фотоэлектрических измерений потоков излучения от небесных объектов на всей небесной сфере. Каждый объект должен наблюдаться неоднократно для обеспечения необходимой точности фотометрии, исключения помех и обнаружения возможной переменности блеска звезд. Вспомогательная задача – получение координат небесных объектов с точностью существенно лучше угловой секунды для их последующей идентификации. Попутно решаемая задача – обнаружение и идентификация объектов Солнечной системы.

Проводимые измерения должны охватить все звезды до 16^m включительно и все объекты Солнечной системы до 14^m . Измерения будут проводиться в десяти спектральных полосах, перекры-

вающих диапазон примерно от 200 нм до 1000 нм. Точность однократного измерения предельно слабых объектов должна составлять не менее 10%, а объектов ярче 12^m – 1%. По итогам всего КЭ точность фотометрии предельно слабых переменных звезд должна составить 1%, а ярких – 0.1% соответственно. Результаты КЭ “Ли́ра-Б” дадут ценную информацию о наблюдаемых объектах для астрономических исследований вообще и для астрофизики в частности, а также позволят создавать звездные каталоги для прикладных применений [1, 2].

Более подробно ожидаемая структура данных наблюдений, которые будут получены в КЭ “Ли́ра-Б”, и характеристики этих данных приведены в [3–5]. Эти данные могут быть применены для решения очень широкого круга различных астрофизических и звездно-астрономических проблем, для которых требуется высокоточная фотометрия звезд и звездоподобных объектов, например, для задач, описанных в работах [4, 6–28].

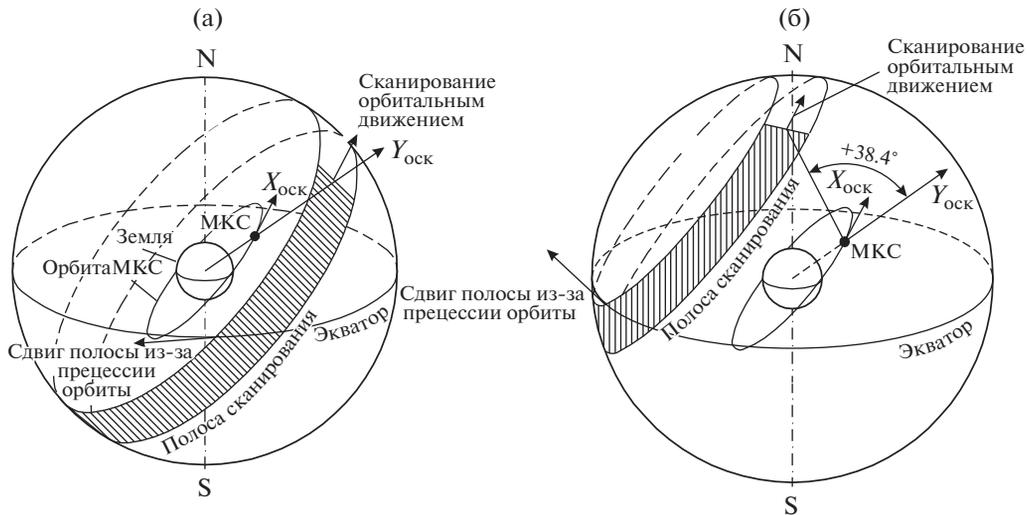


Рис. 1. Основные режимы сканирования неба в космическом эксперименте “Ли́ра-Б”: а) основная ориентация телескопа, когда его ось визирования лежит в плоскости орбиты МКС, б) ось визирования телескопа отклонена на 38.4° к северу, полоса сканирования проходит через северный полюс мира.

1.2. Принципы проведения сканирующего обзора неба с борта МКС

МКС обращается вокруг Земли по низкой круговой орбите в так называемой орбитальной ориентации. Одной стороной она всегда обращена к Земле, и на этой стороне устанавливаются приборы для изучения Земли. Другая сторона всегда обращена в местный зенит. На этой стороне устанавливаются астрономические приборы, в том числе и телескоп “Ли́ра-Б”.

Принцип сканирования всего неба в КЭ “Ли́ра-Б” основан на том, что неподвижный относительно МКС телескоп при полете станции в орбитальной ориентации участвует в двух основных угловых движениях (см. рис. 1а):

- перемещение оси визирования телескопа за счет орбитального движения (обращения) МКС. При этом ось визирования телескопа, направленная в центр полосы сканирования, прочерчивает на небесной сфере большой или малый круг в зависимости от ее ориентации относительно орбитальной плоскости МКС. Поле зрения телескопа “Ли́ра-Б” при этом замечает на небе полосу шириной $w \approx 1^\circ$;
- медленное перемещение полосы сканирования, вызываемое прецессией орбиты МКС в поле тяготения Земли.

Первое из вышеуказанных движений осуществляется с угловой скоростью, равной

$$360^\circ \cos \theta / P_{orb}, \tag{1}$$

где P_{orb} – период орбитального обращения МКС (около 90 минут), а θ – угол между осью визирования телескопа и плоскостью орбиты МКС.

Формально угол θ может изменяться в пределах $\pm 90^\circ$, но для реальных наблюдений имеет смысл изменять его только в пределах $\pm 38.4^\circ$ (см. ниже). Таким образом, скорость сканирования может меняться от 4’/с до 3.1’/с. Сканирование неба ведется только на части каждого орбитального витка МКС; эта доля q зависит от положения Солнца и наклона оси визирования телескопа θ к плоскости орбиты МКС.

Второе движение, связанное с прецессией орбиты МКС, постоянно смещает полосу сканирования примерно на 20’ за орбитальный виток в плоскости экватора Земли (см. рис. 1а) и позволяет охватить наблюдениями часть небесной сферы. Скорость прецессии мала по сравнению со скоростью орбитального движения. Например, при сканировании в плоскости орбиты (угол $\theta = 0^\circ$, см. рис. 1а) за три последовательных орбитальных витка на небесном экваторе происходит смещение плоскости орбиты МКС чуть больше, чем на ширину полосы сканирования (подробнее см. раздел 4).

Поскольку наклонение орбиты МКС (угол между плоскостями орбиты и экватора Земли) составляет $i = 51.6^\circ$, то при оси визирования, лежащей в плоскости орбиты МКС, сканированием охватывается лишь сферический пояс неба $\pm 51.6^\circ$ от экватора, см. рис. 1а (точнее $\pm(i + w/2) = \pm 52.1^\circ$ с учетом ширины полосы сканирования, равной $w \approx 1.0^\circ$). Для обзора околополярных областей небесной сферы необходимо отклонить ось визирования телескопа либо на угол $\theta_0 \equiv 90^\circ - i = 38.4^\circ$, при этом будет сканироваться северный сферический сегмент от $+90^\circ$ до -14° по

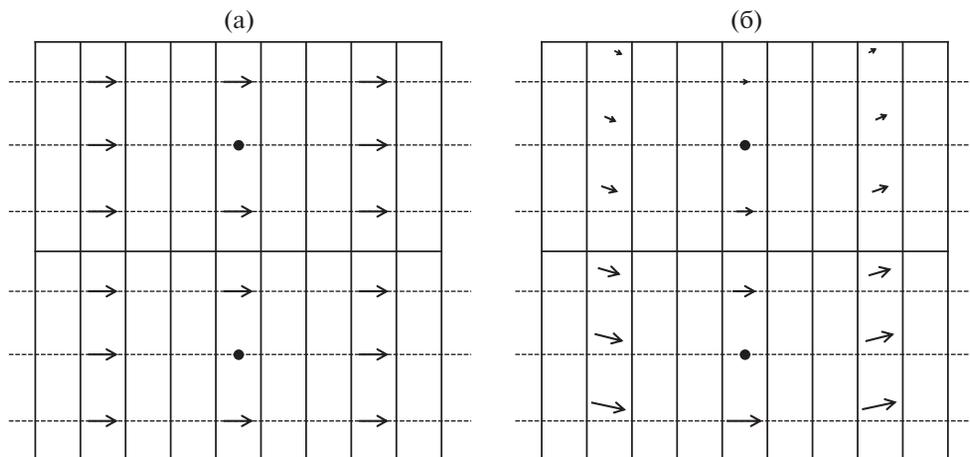


Рис. 2. Прохождение изображений звезд по фокальной плоскости: а) при сканировании неба в плоскости орбиты МКС; б) при полярном сканировании ($\theta = +38.4^\circ$). Черные кружки – центры независимо тактируемых частей фокальной плоскости.

склонению, либо на $-\theta_0$ – для симметричного южного полярного сегмента (рис. 1б). В этих положениях скорость сканирования уменьшается примерно в 1.3 раза (согласно формуле (1)), во столько же раз возрастает время экспозиции объектов (время их прохождения через поле зрения телескопа). Одновременно при полярном сканировании снижается частота попадания звезд в поле зрения телескопа “Ли́ра-Б” [1, 2].

Возможны меньшие по величине отклонения оси визирования телескопа от плоскости орбиты МКС, но при этом некоторая область вокруг полюса будет пропущена (см. раздел 3).

При сканировании неба фоточувствительные матрицы фокальной плоскости работают в режиме временной задержки и накопления (ВЗН), при котором накопленный пакет фотоэлектронов переносится по матрице в том же направлении и с той же скоростью, что и изображения звезд [29].

Проекция фокальной плоскости на небесную сферу имеет угловой размер примерно $1^\circ \times 1^\circ$. Она занята несколькими (9–11) светочувствительными матрицами [2, 30], каждой из которых соответствует своя фотометрическая полоса. Изображения звезд последовательно пересекают эти матрицы, при этом изображения движутся вдоль столбцов матриц, направленных вдоль их короткой стороны (см. рис. 2).

Более подробно КЭ “Ли́ра-Б” описан в статьях [4, 30], а ожидаемые научные данные и их формат – в [3, 5].

1.3. Критерии выбора стратегии сканирования

1.3.1. Общие требования. “Ли́ра-Б” – обзор всего неба. Поэтому вся небесная сфера должна

быть максимально равномерно покрыта наблюдениями.

За длительное время проведения КЭ покрытие неба по прямому восхождению α усредняется, картина получается близкой к осесимметричной относительно направления на полюса мира (т.е. по прямому восхождению в экваториальной небесной системе координат). При этом плотность покрытия неба наблюдениями будет зависеть от склонения δ . Частота наблюдений той или иной точки на небесной сфере зависит от ее склонения δ и угла наклона оси визирования телескопа “Ли́ра-Б” к плоскости орбиты МКС (см. раздел 1.3.3). В результате этого появляются некоторые выделенные склонения, на которых объекты наблюдаются чаще по сравнению с другими.

Цель настоящего исследования – выбрать такую стратегию сканирования, чтобы точки на небесной сфере в среднем *были пронаблюдены максимальное число раз* (т.е. чтобы длительность наблюдений была максимальной при их достаточно равномерном распределении по небу).

1.3.2. Длительность эксплуатации МКС и проведения КЭ “Ли́ра-Б”. Существующая программа эксплуатации МКС рассчитана до 2024 г. включительно. Неясно, будет ли станция после этого вообще продолжать свою работу. Кроме того, возможен вариант, что МКС будет выведена из орбитальной ориентации, что также делает невозможным выполнение КЭ “Ли́ра-Б”.

Изначально, при включении КЭ “Ли́ра-Б” в программу экспериментов на МКС, предполагалось, что он будет продолжаться 5 лет (минимально – 3.5 года). Тогда представлялось, что МКС будет функционировать еще долго и времени для проведения эксперимента будет достаточно. Современная же ситуация такова, что на проведение

космического эксперимента может остаться всего 2–3 года.

Из этого следует, что весь требуемый объем наблюдений необходимо провести в максимально короткий срок.

При этом наблюдения невозможно вести непрерывно. На это есть несколько причин.

1. Оптическая система телескопа “Ли́ра-Б” чувствительна к загрязнениям оптических поверхностей и светопоглощающих поверхностей бленд. Основным источником подобных загрязнений является микроатмосфера МКС. Плотность этой микроатмосферы существенно возрастает при прибытии и отлете транспортных и пилотируемых КА, а также при проведении внекорабельной деятельности космонавтами (астронавтами). В эти интервалы времени наблюдения не ведутся, телескоп закрывается газоплотной защитной крышкой и устанавливается в положение хранения или положение, не мешающее перемещению космонавтов по внешней поверхности МКС [2, 30].

2. При очень малых углах между направлением на Солнце и осью визирования, когда Солнце попадает в поле зрения телескопа, возникает опасность повреждения фоточувствительных приборов фокальной плоскости прямым солнечным излучением. В этом случае входная апертура телескопа закрывается защитной крышкой или телескоп переводится в положение с другой ориентацией оптической оси [1, 2]. Возможно, этой опасной ситуации удастся полностью избежать при правильном построении графика изменения положения телескопа.

3. Еще две причины связаны с попаданием прямых солнечных лучей на входную апертуру телескопа:

- во-первых, возникает засветка фокальной плоскости телескопа рассеянным излучением, не позволяющая производить фотометрические измерения небесных объектов с необходимой точностью;
- во-вторых, тепло, выделяемое фотоприемниками фокальной плоскости телескопа, отводится с помощью радиаторов, расположенных на внутренней стороне корпуса телескопа [2, 30]. Прямое солнечное излучение нагревает бленду телескопа, что приводит к снижению теплоотвода радиаторами и, как следствие, к ухудшению условий проведения фотометрических измерений вплоть до их полной невозможности.

В связи с этим наблюдения проводятся либо когда угол между направлением на Солнце и осью визирования телескопа γ превышает некоторый критический угол γ_{cr} (при “неэффективной” бленде $\gamma_{cr} = 90^\circ$), либо во время пребывания МКС в тени Земли. В последнем случае наблюде-

ния возможны при любом значении угла γ . При нарушении этих условий наблюдения прекращаются, возможно, входная апертура закрывается крышкой.

В телескопе “Ли́ра-Б” установлена бленда (см. раздел 1.4), которая будет позволять вести наблюдения и при меньших углах, чем 90° (угол $\gamma_{cr} < 90^\circ$). К сожалению, по техническим причинам бленда на “Ли́ра-Б” вряд ли будет очень эффективной. Скорее всего, она не позволит наблюдать на углах, меньших $\gamma_{cr} \approx 70^\circ$ от Солнца.

С внекорабельной деятельностью ничего поделать нельзя, но она происходит достаточно редко и по заранее известному расписанию. В остальное время необходимо выбрать такую стратегию наблюдений, чтобы длительность периодов засветки апертуры была минимальной. Это и будет основным условием уменьшения доли наблюдательного времени телескопа.

1.3.3. Особенности сканирования в трех основных положениях телескопа. Как уже было сказано, наблюдения проводятся в трех основных положениях телескопа: с осью визирования лежащей в плоскости орбиты МКС, а также с осью, отклоненной от нее на угол 38.4° к северу или к югу. Дополнительно возможно использование промежуточных углов отклонений $|\theta| < 38.4^\circ$. Сканирование в каждом из этих положений имеет свои особенности.

При сканировании в плоскости орбиты МКС ось визирования телескопа перемещается по большому кругу небесной сферы, а траектории звезд на фокальной плоскости представляет собой прямые¹, которые при правильном расположении светочувствительного детектора будут направлены вдоль столбцов его матриц (см. рис. 2а). Ширина полосы сканирования небольшая ($w \approx 1^\circ$), поэтому кривизной траекторий звезд в ее пределах при сканировании в плоскости орбиты МКС можно пренебречь.

При расположении телескопа под углом θ к плоскости орбиты МКС сканирование происходит по малому кругу небесной сферы, поэтому пути звезд по фокальной плоскости представляют собой дуги окружностей. Поскольку матрицы фотоприемников прямоугольны, это приводит к смазу изображений звезд. Более того, величина смаза различается в разных частях фокальной плоскости (см. рис. 2б). И если на центральной матрице (пятая на рис. 2б) звезды движутся вдоль ее столбцов, расположенных горизонтально, то на крайних матрицах они движутся под углом к столбцам, что приводит к возникновению попе-

¹ Траектории звезд в фокальной плоскости будут прямыми, если оптическая система телескопа “Ли́ра-Б” будет обладать низкой дисторсией. Это требование включено в техническое задание на разработку телескопа.

речного смаза (изображения звезд вытягиваются поперек столбцов матрицы, т.е. вдоль ее строк).

Неодинакова будет и скорость движения изображений по матрицам у разных звезд в поле зрения. У звезд, которые расположены ближе к полюсу орбиты МКС, скорость движения будет меньше, чем у тех, что дальше от него. Перенос же зарядов вдоль столбцов матрицы может производиться только с одинаковой скоростью. Этот эффект приводит к продольному смазу – вдоль направления сканирования неба, т.е. вдоль столбцов матрицы.

Величины продольного и поперечного смазов изображений быстро возрастают с увеличением угла отклонения θ , вплоть до полной невозможности реализации режима ВЗН [31]. Именно поэтому углы отклонения, превышающие по абсолютной величине 38.4° , в КЭ “Лира-Б” скорее всего не будут использоваться (но см. раздел 4).

Для уменьшения продольного смаза матрицы в фокальной плоскости телескопа “Лира-Б” разделены на две независимо тактируемые части по их среднему столбцу: при сканировании по малому кругу ($\theta \neq 0^\circ$) одна из половин матрицы будет ближе к полюсу, а другая дальше от него. Перенос заряда в этих частях матрицы будет производиться с разной скоростью, соответствующей движению изображений звезд в середине каждой из половин матрицы [30]. Таким образом, продольный смаз уменьшится в 2 раза, хотя полностью не исчезнет.

1.4. Влияние бленды

Как было сказано в разделе 1.3.2, солнечные лучи, попадающие на апертуру, создают засветку, мешающую вести наблюдения. Для защиты от них применяются бленды. Для сильного подавления рассеянного излучения бленда должна иметь достаточно большую длину и диаметр, превышающий апертуру телескопа.

В КЭ “Лира-Б” диаметр и длина бленды ограничиваются техническими причинами. Телескоп в виде нескольких блоков доставляется на МКС транспортным грузовым кораблем “Прогресс”. Затем части телескопа вносятся в гермоотсек МКС, потом космонавты через шлюз выносят эти блоки на внешнюю поверхность МКС и соединяют их друг с другом [2, 30]. Действием, которое накладывает самые сильные ограничения на размеры частей телескопа, в том числе и бленды, является вынос их из “Прогресса” в гермоотсек МКС: из-за этого диаметр бленды не может быть больше 60 см, а длина – примерно 120 см. Для высокоэффективной бленды таких габаритов недостаточно.

Можно увеличить длину бленды, сделав ее раскладной. Но слишком длинной делать бленду

тоже нельзя, поскольку длинная бленда будет мешать отводу тепла от фокальной плоскости телескопа “Лира-Б” с помощью радиатора, расположенного на внутренней стороне корпуса телескопа.

Таким образом, необходимо найти компромисс между минимальным рабочим углом бленды $\gamma_{\text{ср}}$ и эффективным охлаждением фокальной плоскости. На данный момент нет ясности, каким он будет, поэтому необходимо рассмотреть стратегию наблюдений для разных значений предельного угла бленды $\gamma_{\text{ср}}$.

2. ОБЩИЙ АНАЛИЗ

2.1. Доступные области небесной сферы

Просканировать все небо с борта МКС, если телескоп находится в одном неизменном положении, невозможно. При расположении оси визирования телескопа в плоскости орбиты МКС с учетом поля зрения телескопа сканируется сферический пояс от $-i - w/2 = -52.1^\circ$ до $i + w/2 = 52.1^\circ$ по склонению, при отклонении на θ_0 или $-\theta_0$ – сферические сегменты от $+90^\circ$ до -14° и $+14^\circ$ до -90° соответственно (см. раздел 1.2).

В общем случае, при фиксированном положении телескопа с осью визирования, отклоненной на угол θ от плоскости орбиты, на небе замечается сферический пояс, северная граница которого для $\theta < \theta_0$ описывается выражением

$$\delta_N(\theta) = \begin{cases} i + w/2 = 52.1^\circ + \theta \\ \text{при } -90^\circ < \theta < +37.9^\circ, \\ 90^\circ \text{ при } +37.9^\circ < \theta < +38.9^\circ, \\ 180^\circ - i + w/2 - \theta = 128.9^\circ - \theta \\ \text{при } +38.9^\circ < \theta < +90^\circ, \end{cases} \quad (2)$$

а южная – выражением

$$\delta_S(\theta) = \begin{cases} -(180^\circ - i + w/2 + \theta) = -128.9^\circ - \theta \\ \text{при } -90^\circ < \theta < -38.9^\circ, \\ -90^\circ \text{ при } -38.9^\circ < \theta < -37.9^\circ, \\ -(i + w/2 - \theta) = -52.1^\circ + \theta \\ \text{при } -37.9^\circ < \theta < +90^\circ, \end{cases} \quad (3)$$

где θ – угол отклонения оси визирования телескопа от плоскости орбиты (положительное значение – к северу).

При $\theta = \pm(90^\circ - i \pm w/2) = \pm(38.4^\circ \pm 0.5^\circ)$ одна из границ стягивается в точку (полюс), в остальных случаях замечаемая область неба имеет вид кольца $\delta_S < \delta < \delta_N$ с двумя непокрытыми наблюдениями областями вблизи полюсов. При изменении угла отклонения оси визирования в пределах $-37.9^\circ < \theta < +37.9^\circ$ замечаемая наблюдениям полоса смещается к северу или к югу, а ее ширина

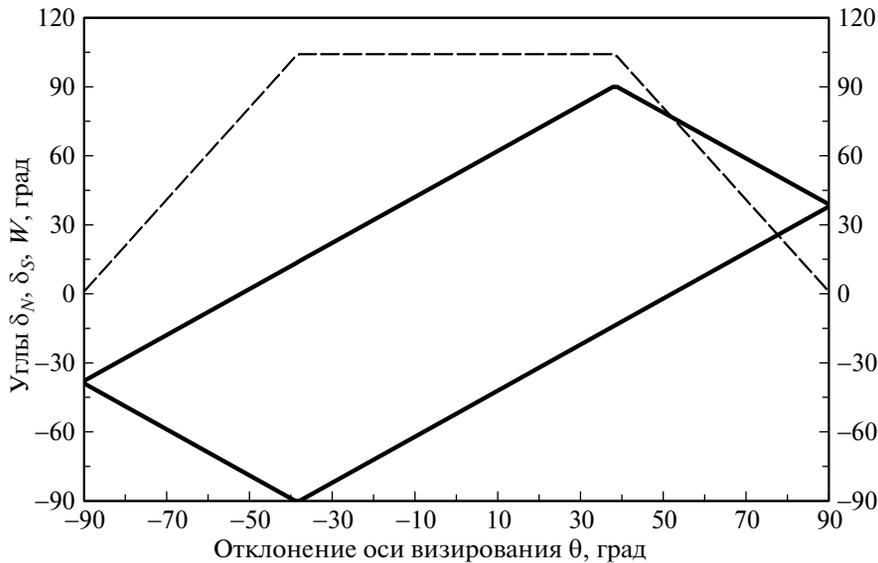


Рис. 3. Зависимость склонения северной границы доступной наблюдениям сферической полосы δ_N (верхняя сплошная линия), склонения южной границы δ_S (нижняя сплошная линия) и ширины W этой полосы (пунктирная линия) от угла θ между осью визирования телескопа и плоскостью орбиты.

остаётся постоянной $W \equiv \delta_N - \delta_S = 2i + w = 104.2^\circ$. При больших отклонениях ширина полосы W начинает уменьшаться с ростом абсолютной величины угла θ и при $\theta = \pm 90^\circ$ область сканирования вырождается в полосу вдоль малого круга с $\delta = \pm 38.4^\circ$ с шириной $W = w = 1^\circ$. Зависимости величин δ_N , δ_S и W от угла отклонения θ приведены на рис. 3.

Как показано выше в этом разделе, ни одно фиксированное положение телескопа (с заданным углом θ) не позволяет просканировать всю небесную сферу. Ответим на вопрос, какое сочетание положений телескопа позволяет решить эту задачу.

КЭ “Ли́ра-Б” необходимо пронаблюдать всю небесную сферу, включая полюса. Полюса можно наблюдать только при углах отклонения оси визирования телескопа θ , близком к $\pm\theta_0 = \pm 38.4^\circ$ (при $37.9^\circ < \theta < 38.9^\circ$ полоса сканирования проходит через северный полюс мира, а при $-38.9^\circ < \theta < -37.9^\circ$ — через южный полюс). При $\theta \approx \theta_0$ наблюдениями охватывается сферический сегмент, включающий в себя всю северную полу-сферу и часть южной примерно до $\delta \approx -14^\circ$. При $\theta \approx -\theta_0$ наблюдениями охватывается часть небесной сферы с $\delta \approx +14^\circ$, включающая южный полюс мира. Эти два сегмента пересекаются в полосе $-14^\circ \leq \delta \leq 14^\circ$ и совместно покрывают всю небесную сферу.

Таким образом, минимальный набор положений телескопа, позволяющий провести с борта

МКС обзор всего неба, требует проведения наблюдений в двух положениях: при $\theta \approx -38.4^\circ$ и при $\theta \approx 38.4^\circ$. К этим двум положениям может быть добавлено сканирование в плоскости орбиты ($\theta = 0^\circ$) и при промежуточных значениях углов θ для достижения максимальной длительности наблюдательного времени и, дополнительно, для уменьшения смаза изображений звезд (см. раздел 1.3.3).

2.2. Доля наблюдательного времени

Рассмотрим подробнее вопрос о стратегии сканирования неба, обеспечивающей максимальную длительность наблюдений.

Для расчетов доли наблюдательного времени на витке $q(t)$ и связанных с ними величин в зависимости от параметров θ , ψ и эффективности бленды $\gamma_{сг}$ была создана численная модель сканирования неба с борта МКС.

Первым вопросом при ее создании был выбор необходимой точности модели. Дело в том, что МКС — самая крупная космическая станция в истории освоения околоземного пространства, которая обращается на довольно низкой орбите (высота около 400 км). Эти два фактора приводят к ее достаточно быстрому торможению атмосферой Земли и, как следствие, к снижению орбиты. Для преодоления этого эффекта 1–2 раза в год орбиту МКС повышают за счет включения реактивных двигателей пристыкованных космических кораблей или самой станции. Следствием этого

Таблица 1. Основные параметры модели

Параметр	Значение
Параметры Солнца и орбиты Земли	
Эксцентриситет орбиты Земли	0
Наклонение эклиптики, ϵ	23.44°
Длительность года, T	365.2422 сут.
Угловой размер Солнца	0
Параметры орбиты Земли	
Эксцентриситет орбиты МКС	0
Наклонение орбиты МКС, i	51.6°
Высота орбиты, h	408 км
Период обращения, P_{orb}	93 мин
Период прецессии, P	72.48 сут.
Параметры тени Земли	
Сплюснутость Земли	не учитывается
Радиус Земли, R	6371 км
Форма тени Земли	цилиндр
Влияние атмосферы Земли	не учитывается
Начальные условия (положение в момент $t = 0$)	
Солнце на эклиптике	в точке зимнего солнцестояния $\delta_{\odot} = -\epsilon = -23.4^{\circ}$
Долгота восходящего узла орбиты МКС	$\Omega = 90^{\circ}$
МКС на орбите	$\delta_{MKS} = i = +51.6^{\circ}$

является изменение параметров орбиты МКС на несколько процентов в течение года².

В связи с этим для проведения расчетов требовалась модель с процентной точностью, что позволило отказаться от учета большинства тонких эффектов, к которым относятся, например, эксцентриситет орбит МКС вокруг Земли и Земли вокруг Солнца, а также сплюснутость Земли и коническая форма тени Земли.

Основные параметры, используемые в модели, а также начальные условия моделирования приведены в табл. 1.

На рис. 4 показаны графики зависимости доли наблюдательного времени q на каждом витке от времени в течение одного года, полученные с помощью этой численной модели. В начальный момент Солнце находилось в южном полушарии и было максимально удалено от экватора, одновременно оно находилось к югу от плоскости орбиты

² Значения некоторых параметров сохраняются с лучшей точностью, например, наклонение орбиты не выходит за пределы $i = 51.6^{\circ} \pm 0.1^{\circ}$.

МКС. Эта модель и такие начальные условия используются для проведения всех расчетов, представленных ниже. Дополнительно при построении графика 4 считалось, что бленда телескопа “неэффективна” ($\gamma_{ст} = 90^{\circ}$), влияние тени Земли не учитывалось.

Наблюдения при отклонении оси телескопа на 38.4° к северу показаны толстой сплошной линией, на 38.4° к югу – тонкой сплошной линией. Наблюдения в плоскости орбиты МКС представлены штрих-пунктирной линией. Эта линия представляет собой прямую, проходящую по уровню 50% наблюдательного времени. Последнее понятно, поскольку при таком положении телескопа равенство $\gamma = 90^{\circ}$ достигается в диаметрально противоположных точках орбиты при любом положении Солнца и на любом витке засветка длится ровно половину времени.

Интереснее ведут себя сплошные кривые. Рассмотрим их поведение для случая отклонения телескопа к северу, показанного на рис. 4 толстой сплошной линией.

Заметим, что в течение года склонение Солнца меняется в пределах $|\delta_{\odot}| < \epsilon = 23.4^{\circ}$ (здесь ϵ – наклонение эклиптики к небесному экватору). Максимальное значение этого угла меньше наклонения орбиты МКС $i = 51.6^{\circ}$, таким образом при любом положении Солнца на эклиптике оно будет попеременно оказываться то к югу, то к северу от плоскости орбиты станции в зависимости от фазы прецессии.

В момент, соответствующий началу рис. 4, Солнце находится в точке зимнего солнцестояния, т.е. в самой южной точке эклиптики и одновременно к югу от плоскости орбиты МКС. Это положение соответствует рис. 5а. На рис. 4 видно, что уже в начальный момент доля наблюдательного времени $q(0)$ на витке превышает 50%, далее она растет и вскоре после зимнего равноденствия наступает период, когда засветки Солнцем на витке не происходит вообще ($q = 1$) и наблюдения можно вести непрерывно в течение примерно 10 сут. Затем, по мере прецессии орбиты, доля наблюдательного времени уменьшается. Примерно через половину периода прецессии Солнце оказывается к северу от плоскости орбиты и доля наблюдательного времени $q(t)$ на витках становится меньше 50%. Поскольку склонение Солнца остается отрицательным и оно по-прежнему находится в южном полушарии небесной сферы (см. рис. 5б), то интервал времени с продолжительной засветкой достаточно короток. Доля наблюдательного времени достигает минимума и начинает расти. После ухода Солнца к югу от орбиты прецессионный цикл завершается.

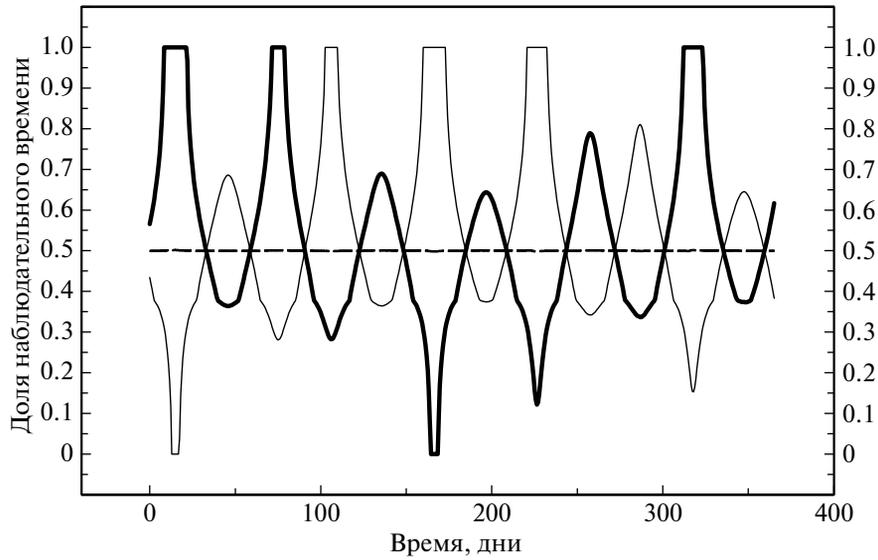


Рис. 4. Зависимость доли наблюдательного времени на орбитальном витке от времени: штриховая линия — ось визирования телескопа в плоскости орбиты МКС ($\theta = 0^\circ$); толстая сплошная линия — ось визирования телескопа отклонена на $\theta = +38.4^\circ$, полоса сканирования проходит через северный полюс мира; тонкая сплошная линия — ось визирования телескопа отклонена на $\theta = -38.4^\circ$, полоса сканирования проходит через южный полюс мира.

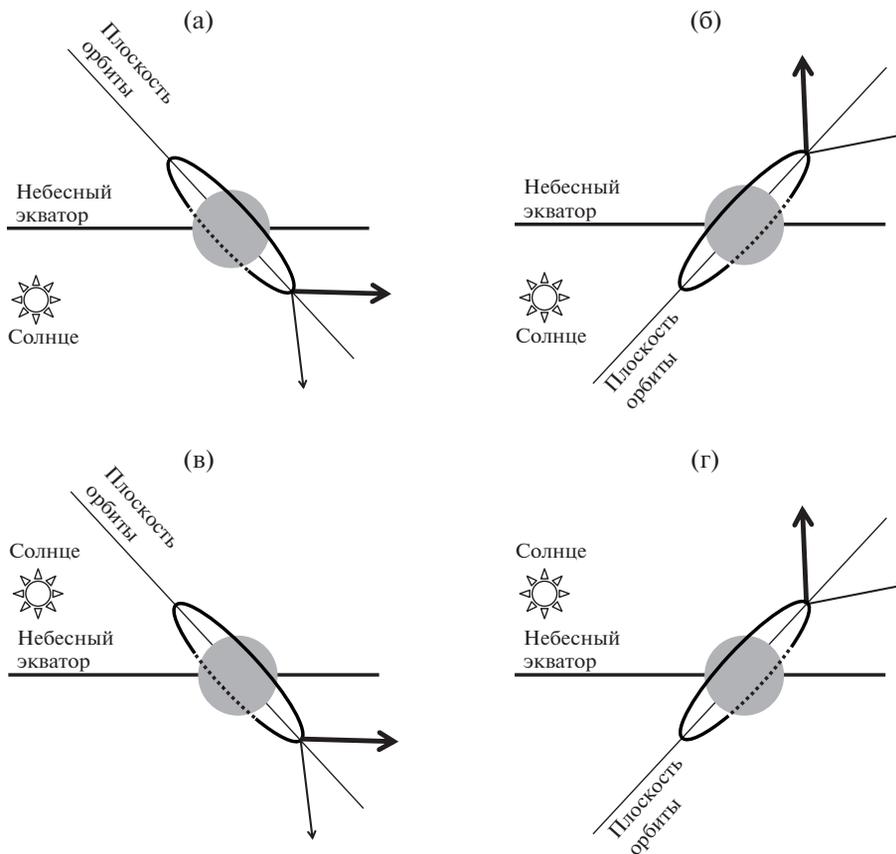


Рис. 5. Схематическое изображение четырех возможных ситуаций при сканировании с борта МКС: Солнце в южном или северном полушарии небесной сферы и, одновременно, к югу или к северу от плоскости орбиты. На рисунках север расположен сверху.

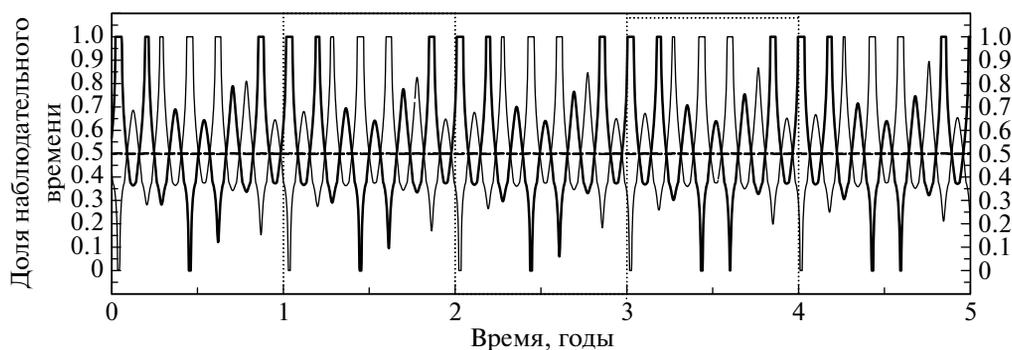


Рис. 6. Зависимость доли наблюдательного времени для трех положений телескопа ($\theta = 0^\circ$ и $\pm 38.4^\circ$) на интервале времени 5 лет. Начальные условия и обозначения аналогичны использованным на рис. 4. Вертикальные пунктирные линии отмечают границы годов.

Далее этот цикл повторяется снова, но поскольку из-за движения Солнца по эклиптике его долгота уменьшается, то длительность интервала времени с большой долей наблюдательного времени ($q > 0.5$) уменьшается, а с длительной засветкой ($q < 0.5$) — увеличивается по сравнению с первым циклом.

Через четверть года от начального момента наступает равноденствие, Солнце переходит в северное полушарие небесной сферы и полгода находится в нем. Эта ситуация показана на рис. 5в (Солнце к югу от орбиты МКС) и 5г (Солнце к северу от орбиты). В эти полгода интервал времени с $q(t) > 50\%$ занимает меньше половины прецессионного периода, а с длительной засветкой ($q(t) < 50\%$), соответственно, больше половины прецессионного периода. Вблизи летнего солнцестояния может наступить ситуация, когда засветка занимает весь виток ($q(t) = 0$) и наблюдения при $\theta = \theta_0 = 38.4^\circ$ оказываются невозможны на нескольких орбитальных витках подряд.

После осеннего равноденствия (3/4 года от начала графика) Солнце возвращается в южное полушарие небесной сферы, интервалы времени, в которых $q(t) > 50\%$ начинают занимать более половины прецессионного периода и растут, а интервалы с $q(t) < 50\%$ уменьшаются.

Спустя год картина почти точно повторяется. Это связано с тем, что период прецессии орбиты МКС примерно в пять раз короче тропического года: $N = T/P \approx 5.04$, здесь $T \approx 365.2422$ сут. — длительность года, $P \approx 72.48$ сут. — период прецессии орбиты МКС, используемый для расчетов. График, аналогичный рис. 4, но для интервала времени 5 лет, показан на рис. 6. На этом рисунке заметно медленное смещение годичного шаблона влево и постепенное изменение высот соседних пиков на кривых.

Из-за того, что движение Солнца по эклиптике и прецессия орбиты МКС происходят в противо-

положных направлениях, то синодический период прецессии орбиты МКС составляет $S = 60.47$ сут., поэтому в год укладываются $N_1 = N + 1 = 6.04$ прецессионных циклов (см. рис. 4 и 6).

В поведении кривых для $\theta = \theta_0$ и $-\theta_0$ присутствуют два периода: период прецессии орбиты МКС — сидерический ($P = 72.48$ сут.) или синодический ($S = 60.47$ сут.) — и годичный T .

На масштабах прецессионного периода кривые, соответствующие противоположным положениям телескопа ($\theta = -38.4^\circ$ и $+38.4^\circ$), находятся в противофазе. Такое поведение понятно из рис. 5: когда Солнце находится в южном полушарии, отклонение оси визирования телескопа к северу ($\theta = +38.4^\circ$) дает в среднем большую длительность наблюдений, чем отклонение телескопа к югу, а когда Солнце находится в северном полушарии небесной сферы, реализуется противоположная картина. Противоположность фаз этих кривых очень хорошо видна из рис. 4 и 6.

Годичный период объясняется тем, что в используемом здесь приближении положения Солнца с интервалом полгода являются диаметрально противоположными на небесной сфере. Отсюда можно ожидать, что кривые для $\theta = -\theta_0$ и $+\theta_0$ будут похожи, если одну из них сдвинуть на полгода. На самом деле это утверждение неточно, поскольку $N_1 \approx 6$ — четное, то при сдвиге ровно на полгода кривые для двух положений телескопа останутся в противофазе. Для их совмещения сдвиг надо уменьшить на половину синодического периода прецессии S , при этом сдвиг кривых составит $\Delta t = (T - S)/2 \approx 152.39$ сут. Кривые с $\theta = \pm\theta_0$ и с этим сдвигом по времени показаны на рис. 7. Как видно из этого рисунка, совпадение очень хорошее, вплоть до деталей кривых.

Амплитуда изменения $q(t)$ в ходе прецессионного цикла возрастает с ростом абсолютной величины угла $|\theta|$ отклонения оси визирования теле-

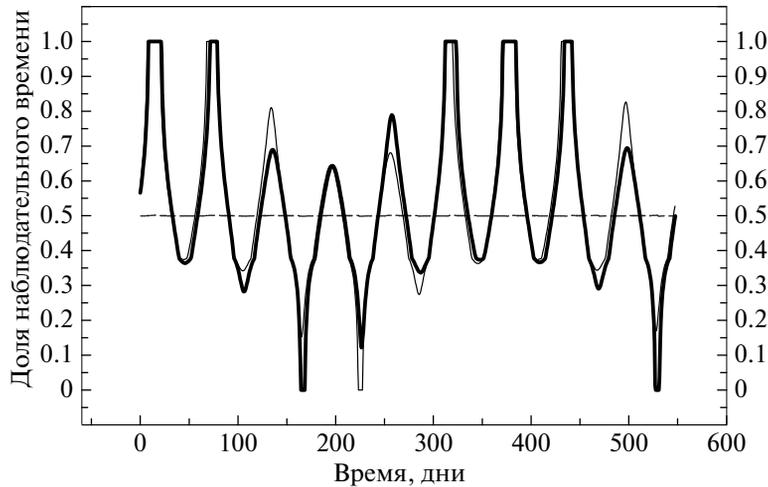


Рис. 7. Подобие кривых доли наблюдательного времени на орбитальном витке: толстая сплошная линия — зависимость для $\theta = +38.4^\circ$; тонкая линия — зависимость для $\theta = -38.4^\circ$ сдвинутая на $\Delta t = (T - S)/2 = 152.39$ сут. влево по времени. На графике показаны кривые для полуторагодового интервала времени. Пунктирная линия соответствует 50% наблюдательного времени.

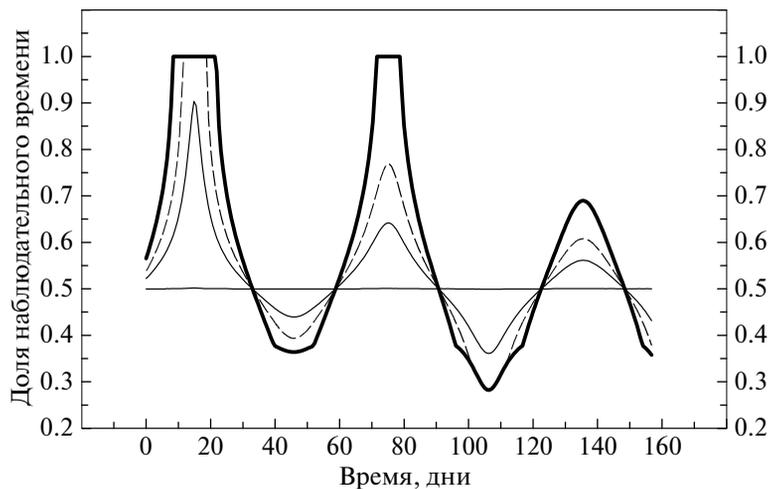


Рис. 8. Зависимость доли наблюдательного времени на витке от угла θ отклонения оси визирования телескопа от плоскости орбиты МКС для $\psi = 0^\circ$. Ось времени охватывает максимумы трех последовательных прецессионных циклов. Толстая сплошная линия соответствует $\theta = \theta_0 = 38.4^\circ$, пунктирная линия — $\theta = 25^\circ$, тонкая сплошная линия — $\theta = 15^\circ$. Горизонтальная прямая проходит по уровню 50% и соответствует $\theta = 0^\circ$. С ростом угла θ амплитуды кривых возрастают, но зависимость не является линейной (например, на некоторых интервалах времени кривые могут совпадать друг с другом).

скопа от плоскости орбиты МКС. На рис. 8 показаны кривые для $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 25^\circ$ и 38.4° . В среднем, чем больше угол отклонения θ , тем выше кривая идет в области $q > 50\%$ и тем ниже в области $q < 50\%$, но зависимость не линейная, например, в области 100 дней $< t < 110$ дней кривые для $\theta = 25^\circ$ и 38.4° (а также для всех промежуточных значений θ) совпадают. Кривые $q(t)$ при $\theta < 0$ ведут себя в зависимости от угла θ аналогичным образом.

2.3. Эффект от тени Земли

Положение оси визирования телескопа «Лира-Б» определяется двумя углами. Первый из них — угол отклонения оси визирования от плоскости орбиты МКС θ . Зависимость доли наблюдательного времени $q(t)$ от этого угла рассмотрена в предыдущем разделе (см. раздел 2.2). Второй угол ψ описывает поворот оси визирования в плоскости орбиты МКС (вокруг оси, перпендикулярной мгновенному положению плоскости

орбиты МКС). Определим его как угол между проекцией оси визирования телескопа на плоскость орбиты и направлением в локальный зенит (это направление совпадает с вектором “центр Земли–МКС”). При $\theta = \psi = 0^\circ$ телескоп направлен в локальный зенит станции. Положительные значения ψ соответствуют отклонению телескопа в направлении, противоположном орбитальному движению МКС.

Формально этот угол может меняться в интервале $-90^\circ < \psi < 90^\circ$ (при $|\psi| > 90^\circ$ поле зрения телескопа начинает перекрываться корпусом МКС). В действительности же существуют технические ограничения, связанные с местом установки телескопа “Лири-Б” на Российском сегменте МКС, которые позволяют менять ψ в только пределах $-15^\circ < \psi < 60^\circ$: при $\psi > 60^\circ$ в апертуру телескопа начинают попадать блики от элементов конструкций МКС, при $\psi < -15^\circ$ в поле зрения попадает модуль МИМ2. Эту ситуацию иллюстрирует рис. 9.

Угол ψ оказывает на результаты сканирования неба существенно более слабое воздействие, чем угол θ . Изменение ψ не меняет круга небесной сферы, по которому движется ось визирования телескопа, и не приводит к изменению покрытия неба. Телескоп будет просто повернут на угол ψ вперед или назад по ходу сканирования, в итоге будут регистрироваться те же участки неба, но на несколько минут раньше или позже.

Наиболее существенным влияние угла ψ на процесс сканирования оказывается при прохождении МКС через тень Земли. Когда станция освещена Солнцем (т.е. находится вне тени), наблюдения возможны, только когда угол между направлением на Солнце и осью визирования телескопа $\gamma > \gamma_{cr}$ ($\gamma_{cr} \leq 90^\circ$, см. раздел 1.3.2), когда МКС находится в тени Земли, наблюдения можно вести при любом угле γ .

Рассмотрим рис. 10, изображающий орбиту МКС в момент, когда Солнце находится в ее плоскости. Показаны несколько характерных положений МКС на орбите, и для каждого из них даны направление в локальный зенит (пунктирная стрелка) и направление, отстоящее от зенита на угол ψ (сплошная стрелка). Рассмотрим случай неэффективной бленды телескопа ($\gamma_{cr} = 90^\circ$) и режим сканирования в плоскости орбиты ($\theta = 0^\circ$).

Когда телескоп направлен в местный зенит, тень Земли никак не сказывается на наблюдениях. Пусть МКС движется по часовой стрелке в направлении возрастания номеров отмеченных положений. В точке 1, которая соответствует прохождению МКС над терминатором, угол γ становится больше 90° , и наблюдения начинаются. Половину орбитального витка на дуге

$\overline{1-2-3-4-5}$ проведение наблюдений возможно, поскольку $\gamma > 90^\circ$. На части этой дуги, а именно на дуге $\overline{2-3-4}$, МКС оказывается в тени Земли, но наблюдения там были бы возможны и при отсутствии тени, так что эффекта от нее нет. В точке 5 угол γ снижается до 90° , и наблюдения прекращаются (на дуге $\overline{5-6-1}$ они невозможны). Как уже говорилось, при телескопе, направленном в зенит, наблюдения возможны ровно на половине орбитального витка.

Теперь рассмотрим телескоп, ось визирования которого лежит в плоскости орбиты МКС, но отклонена от местного зенита на угол ψ . (Если обращение станции на рис. 10 происходит по часовой стрелке, то показанные отклонения соответствуют $\psi > 0$.) В начальной точке витка 1 угол $\gamma < 90^\circ$, и наблюдения невозможны. Угол γ достигнет критического значения 90° только в точке 3, но до этого, в точке 2, МКС войдет в тень Земли, и наблюдения можно будет начать в ней (на дуге $\overline{1-2}$ наблюдения вести невозможно из-за того, что $\gamma < 90^\circ$). Наблюдения продолжатся на дуге $\overline{2-3-4-5-6}$, причем на части этой дуги $\overline{2-3-4}$ наблюдения возможны из-за нахождения станции в тени Земли, на дуге $\overline{3-4-5-6}$ из-за того, что $\gamma > 90^\circ$, а на дуге $\overline{3-4}$ выполняются оба этих условия. Наблюдения прекращаются в точке 6, расположенной вне тени Земли, в которой угол γ снижается до 90° , и на дуге $\overline{6-1}$, замыкающей орбитальный виток, вести не могут.

Таким образом, при отклонении оси телескопа на угол $\psi > 0$ может появиться дополнительный участок витка (дуга $\overline{2-3}$), на котором могут вестись наблюдения, и время наблюдений будет занимать более половины оборота. Дополнительное время появляется сразу после входа станции в тень Земли.

Если предположить, что движение МКС на рисунке идет против часовой стрелки, то мы будем иметь дело с ситуацией $\psi < 0$. В этом случае увеличение наблюдательного времени также будет иметь место, дополнительная возможность вести наблюдения будет появляться при прохождении дуги $\overline{3-2}$ перед самым выходом из тени Земли. Легко понять, что одинаковые по величине, но противоположные по направлению отклонения телескопа вдоль плоскости орбиты дают одинаковый прирост наблюдательного времени.

Чтобы описанный эффект имел место, точка 3 на рис. 10 должна находиться в тени Земли. Для этого необходимо, чтобы $|\psi| > \chi$, где χ – угол между терминатором (точка 1) и точкой входа или

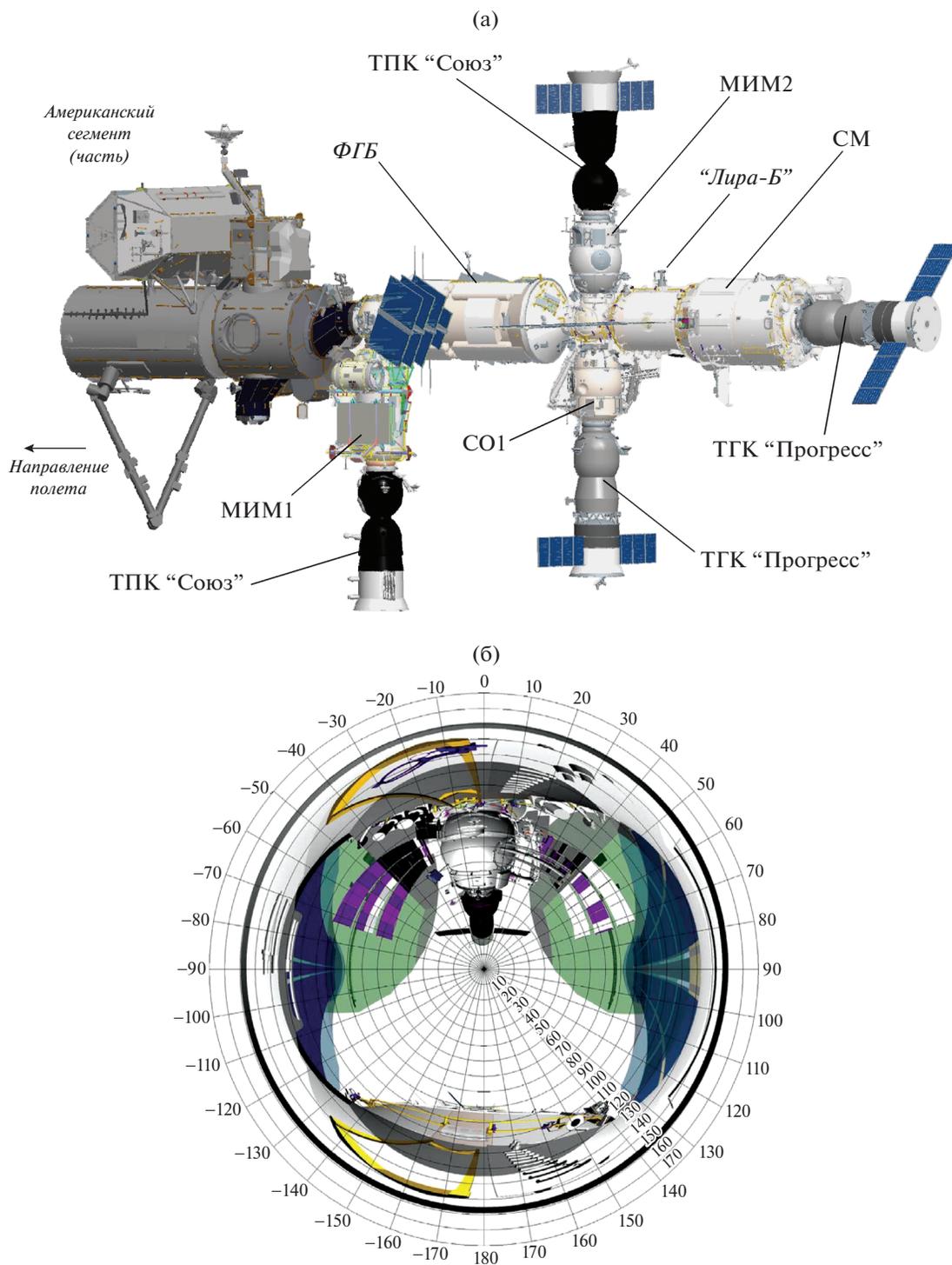


Рис. 9. а) Современная конфигурация Российского сегмента МКС с указанием места установки телескопа "Лири-Б". Орбитальное движение МКС направлено влево. б) Вид верхней полусферы из точки установки телескопа "Лири-Б" — унифицированного рабочего места Н1 Служебного модуля РС МКС. Плоскость орбиты МКС проходит через отметки "0", "180" и центр рисунка. Положительное отклонение ψ направлено от центра рисунка вниз к отметке "180". Рисунки взяты из "Справочника пользователя РС МКС" [34].

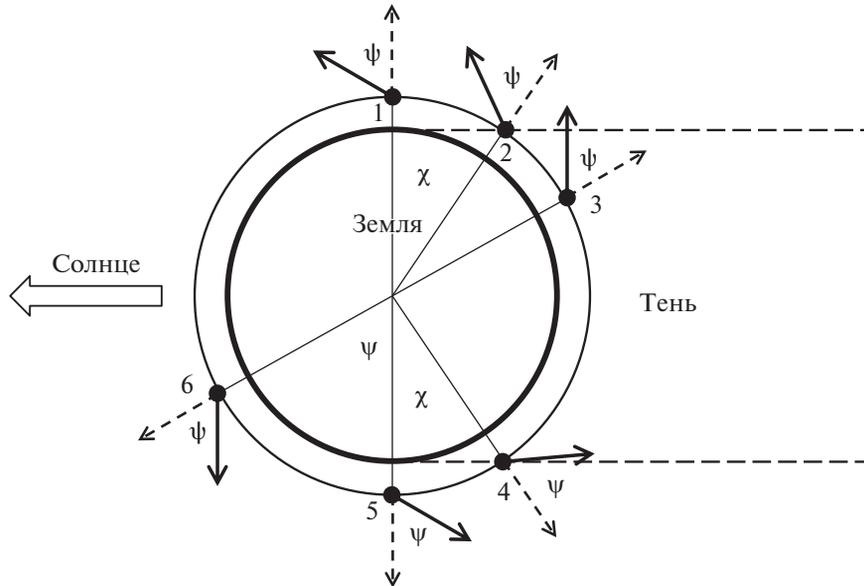


Рис. 10. Иллюстрация влияния тени Земли на длительность наблюдений на орбитальном витке при ненулевом угле ψ .

выхода МКС из тени (точка 2) (если $|\psi| > \chi$ эффекта нет; угол χ показан на рис. 10). Величина этого угла определяется следующим соотношением:

$$\cos \chi = \left(\frac{R}{R+h} \right), \quad \text{т.е.} \quad \chi \approx 20^\circ,$$

где R – радиус Земли (6371 км), а h – высота орбиты МКС (примерно 408 км). При наличии эффекта длина дуги орбиты, на которой возможны дополнительные наблюдения, составляет $180^\circ + \psi - \chi$. Считая максимально возможный угол поворота вдоль плоскости орбиты равным $\psi_{\max} = 60^\circ$, дополнительная дуга орбиты, на которой становятся возможны наблюдения, составляет 40° , т.е. $40^\circ/360^\circ = 0.11$ часть витка. Таким образом, максимальное возможное увеличение длительности наблюдений за счет тени Земли не превышает 11% орбитального периода.

При повороте телескопа в плоскости орбиты в направлении орбитального движения МКС дополнительное время наблюдения появляется перед выходом МКС из тени. При повороте в противоположную сторону ровно такой же выигрыш будет появляться сразу после входа МКС в тень.

Дополнительное время наблюдений, обеспечиваемое тенью Земли, может появляться как при отклонении оси телескопа от плоскости орбиты ($\theta \neq 0$), так и при (незначительном) удалении Солнца от плоскости орбиты. На рис. 11 на верхнем графике приведены зависимости долей наблюдательного времени $q(t)$ с учетом и без учета эффекта тени Земли, на нижнем графике – приращения долей наблюдательного времени

$$\Delta(\theta, t) = q(\psi, \theta, t) - q(0, \theta, t).$$

Кривые построены для трех основных ориентаций телескопа $\theta = 0^\circ$ и $\pm 38.4^\circ$ для $\psi = 0^\circ, 40^\circ$ и 60° . Из графиков видно, что при $\theta = 0^\circ$ приращение имеет место почти во всех фазах прецессионного цикла и в максимумах достигает полученной выше максимальной оценки 11% для $\psi = \psi_{\max} = 60^\circ$ (~5.5% для $\psi = 40^\circ$).

При $\theta = \pm 38.4^\circ$ приращение возникает только на некоторых фазах прецессии, но зато его амплитуда примерно в полтора раза больше.

Средние за год значения долей наблюдательного времени $\langle q \rangle$ представлены в табл. 2. Видно, что эффект есть, но он невелик и для ψ_{\max} в среднем по году не превышает ~9%.

2.4. Влияние бленды телескопа

Все приведенные выше расчеты проделаны для “неэффективной” бленды телескопа с $\gamma_{\text{ср}} = 90^\circ$. Очевидно, что при любом положении телескопа доля наблюдательного времени q будет

Таблица 2. Доля наблюдательного времени за 1 год наблюдений для телескопа с заданной и неизменной ориентацией (θ, ψ) с учетом влияния тени Земли для “неэффективной” бленды

θ	$ \psi $		
	$\lesssim 20^\circ$	40°	60°
0°	50%	54%	59%
$\pm 38.4^\circ$	53%	57%	61%

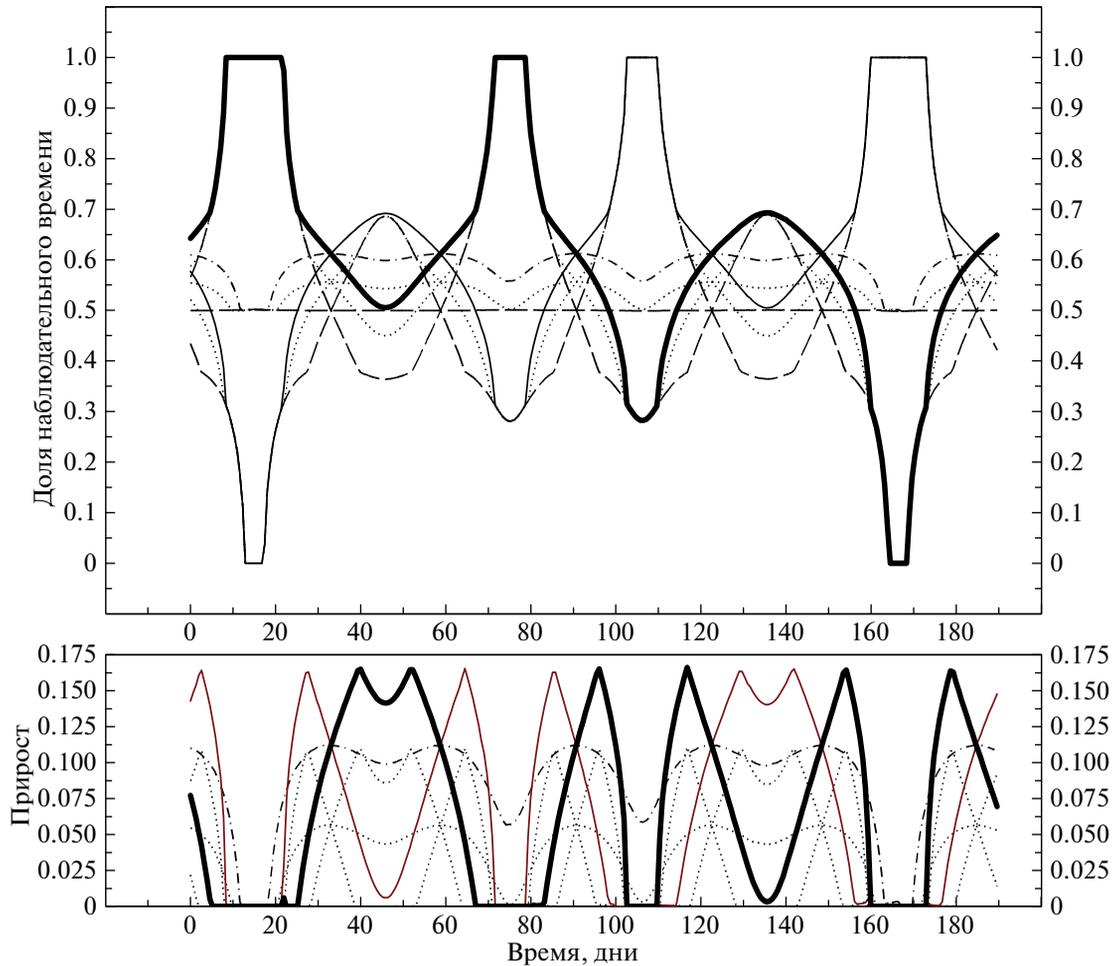


Рис. 11. На верхнем графике показана зависимость доли наблюдательного времени на орбитальном витке от времени $q(t)$ с учетом влияния тени Земли: сплошные линии соответствуют $\psi = 60^\circ$, толстая – ось визирования телескопа отклонена на $\theta = +38.4^\circ$; тонкая – ось визирования телескопа отклонена на $\theta = -38.4^\circ$, штрих-пунктирная – ось визирования телескопа в плоскости орбиты МКС $\theta = 0^\circ$ (последняя имеет вид горизонтали $q = 0.5$). Пунктирными линиями показаны кривые для $\psi = 40^\circ$, штриховыми – для $\psi = 0^\circ$. Обратите внимание, что все кривые с одинаковыми значениями ψ пересекаются в одной точке. Штриховые кривые совпадают с показанными на рис. 4 (без учета влияния тени Земли). Ось времени охватывает примерно три прецессионных цикла. На нижнем графике приведены приращения долей наблюдательного времени для $\psi = 60^\circ$ и 40° . Типы линий те же, что и на верхнем графике. Приращения наблюдательного времени появляются только в некоторых частях прецессионного периода орбиты.

расти по мере уменьшения γ_{cr} . Зависимость $q(t)$ для разных значений γ_{cr} показана на рис. 12. При построении этих зависимостей учитывался эффект тени Земли, описанный в разделе 2.3.

3. СТРАТЕГИИ СКАНИРОВАНИЯ НЕБЕСНОЙ СФЕРЫ

3.1. Режимы переключений телескопа

Выше было показано, что нет единственного положения телескопа, при котором можно было бы просканировать всю небесную сферу. Также нет единственного положения телескопа, в котором доля наблюдательного времени q всегда

больше, чем в других: в любом положении телескопа q зависит от склонения Солнца и долготы восходящего узла орбиты МКС, и они могут принять такие значения, что наблюдать в этом положении будет невыгодно. При этом в другом положении в это же время доля наблюдательного времени может быть существенно больше. Поэтому телескоп необходимо переключать, добиваясь покрытия наблюдениями всего неба и одновременно максимальной суммарной длительности наблюдательного времени (равносильно, максимальной средней доле наблюдательного времени $\langle q \rangle$).

Возможны два режима переключений. Первый – редкие переключки, в этом режиме телескоп не

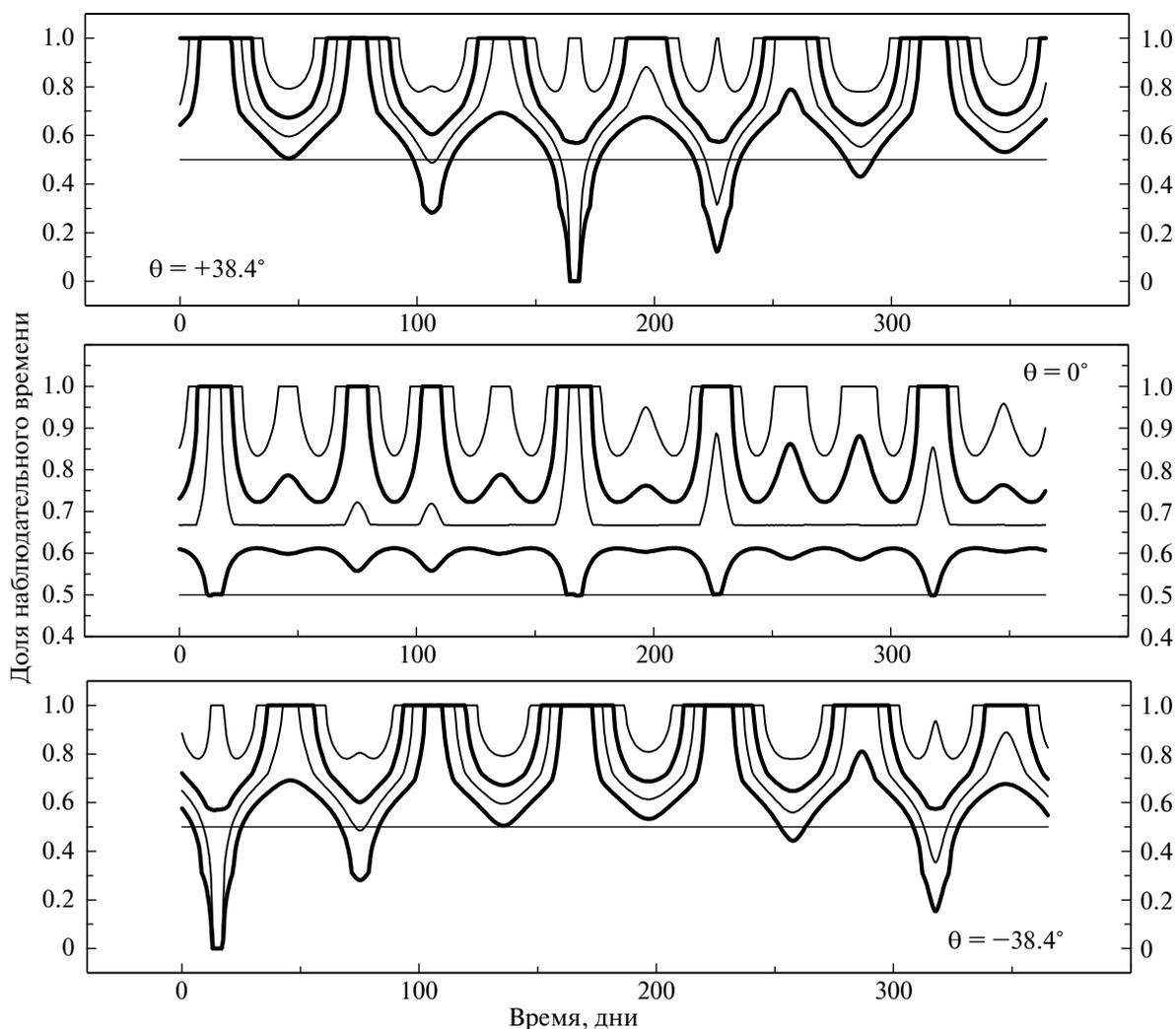


Рис. 12. Графики зависимости доли наблюдательного времени на витке $q(t)$ за один год. Верхний график соответствует $\theta = +38.4^\circ$, средний — $\theta = 0^\circ$, нижний — $\theta = -38.4^\circ$. Графики построены для $\psi = 60^\circ$. На каждом графике приведены кривые для $\gamma_{cr} = 90^\circ, 70^\circ, 50^\circ$ и 30° (снизу вверх), кривые для $\gamma_{cr} = 70^\circ$ и 30° показаны более тонкими линиями.

меняет своего положения относительно МКС, по крайней мере, несколько орбитальных витков. К редким относятся переключки с интервалом 1 сут., 1 прецессионный период орбиты или 1 год. Как будет показано в разделе 3.2, оптимальными оказываются переключки примерно 1 раз в месяц. Другие варианты редких переключек не дают выигрыша.

Второй режим — частые переключки, которые проводятся несколько раз на каждом орбитальном витке МКС. В таком режиме наблюдения можно было бы вести непрерывно³, но такой режим трудно реализовать технически. Во-первых, он создает большую нагрузку на подвижные элементы телескопа, увеличивая износ и повышая вероятность поломки. Во-вторых, каждая

переключка занимает некоторое время, проведение наблюдений в течение которого невозможно, и даже 1–2 переключки на витке могут существенно уменьшить длительность наблюдательного времени.

3.2. Стратегии сканирования небесной сферы

Учитывая характер движения Солнца по эллиптике, очевидной является так называемая “сезонная схема” сканирования неба [32]: летом, когда Солнце максимально удаляется к северу от небесного экватора, телескоп отклоняется на 38.4° к югу от плоскости орбиты, зимой — к северу, а весной и осенью сканирование ведется в плоскости орбиты. В этой схеме телескоп переключается четыре раза в год. Средняя за год доля наблюдательного времени составляет $\langle q \rangle \approx 58\%$

³ Исключая длительность самого перенаведения.

(при “неэффективной” бленде и без учета внекореабельной деятельности). Существуют и другие стратегии сканирования с близкой эффективностью (см. [30]). Можно ли ее увеличить?

Из графиков, показанных на рис. 4, 6, 8 и 11, видно, что в разное время года, при разных фазах прецессии орбиты МКС и для разных положений телескопа доля наблюдательного времени на орбитальном витке разная. Для определения режима наблюдений, при котором достигается абсолютный максимум наблюдательного времени, необходимо проделать следующую процедуру. Сначала задается эффективность бленды телескопа (значение угла $\gamma_{cr} \leq 90^\circ$). Затем рассчитываются кривые $q(t)$ для всех технически допустимых ориентаций телескопа: $-38.4^\circ < \theta < 38.4^\circ$ и $-15^\circ < \psi < 60^\circ$. Максимальное время наблюдений обеспечивает верхняя огибающая этого семейства кривых:

$$\bar{q}(t) = \sup_{\forall \theta, \psi} q(t, \theta, \psi).$$

Соответственно телескоп необходимо переключать в тот момент, когда в другом положении наблюдать становится более выгодно, т.е. в моменты пересечения кривых из семейства $q(t, \theta, \psi)$.

Рассмотрим вопрос о местах пересечений этих кривых подробнее. В этом нам поможет проведенное выше (в разделе 2) рассмотрение зависимости поведения кривых $q(t)$ от параметров θ и ψ . Наиболее проста ситуация с зависимостью $q(t)$ от угла ψ . Прирост $\Delta(t)$ наблюдается при умеренных значениях доли наблюдательного времени ($q \approx 0.5$), прирост всегда неотрицательный и монотонно растет в зависимости от $|\psi|$. Соответственно максимальное значение $\Delta(t)$ достигается при максимальном значении $|\psi|$, т.е. при

$$\max \Delta(t) = \Delta(t, \psi_{\max}), \quad \psi_{\max} = 60^\circ.$$

Теперь рассмотрим зависимость q от θ . Из рис. 8 видно, что вблизи максимальных значений $q(t)$ для кривых с $\theta > 0$ выше всех проходит кривая $\theta = \theta_0$, а для кривых с $\theta < 0$ — кривая $\theta = -\theta_0$ (это следует из сравнения рис. 8 и 7).

Ситуация с промежуточными значениями q сложнее. Расчеты показывают следующее (см. рис. 13). Как видно из рисунка, все кривые $q(t, \theta)$ при любых значениях ψ и $\gamma_{cr} = 90^\circ$ (“неэффективной” бленде) пересекаются в одной точке, т.е. в один и тот же момент времени. При $\gamma_{cr} < 90^\circ$ кривые $q(t)$ для разных θ перестают пересекаться в одной точке (кривые для $\theta = 0^\circ$ и $\pm\theta_0$ образуют криволинейные “треугольники”). При самом большом значении q пересекаются кривые для $\theta = \pm\theta_0$. При этом пересечения кривых $q(t)$ для $\gamma_{cr} = 90^\circ$ и любых θ , а также кривых $q(t)$ с

$\theta = \pm 38.4^\circ$ и $\gamma_{cr} = 90^\circ$ происходят в один и тот же момент времени, это иллюстрируют вертикальные линии, проведенные на рис. 13.

При $\gamma_{cr} \leq 40^\circ$ характер пересечения меняется: кривые $q(t)$ с $\theta = \pm\theta_0$ до пересечения принимают максимальное значение $q = 1$, в результате чего возникает не пересечение, а наложение этих кривых. Криволинейные “треугольники” превращаются в “трапеции” с горизонтальным верхним основанием, соответствующим значению $q = 1$. Момент времени, в который пересекаются кривые при $40^\circ \leq \gamma_{cr} \leq 90^\circ$, лежит внутри верхнего основания “трапеции”. Изменение вида пересечения кривых $q(t)$ происходит в интервале углов $30^\circ < \gamma_{cr} < 40^\circ$. Можно сделать предположение, что изменение поведения происходит при $\gamma_{cr} = \theta_0 = 34.8^\circ$.

Таким образом, из приведенных выше рассуждений и из анализа рис. 13 следует вывод, что при фиксированных значениях углов ψ и γ_{cr} максимальное время наблюдений получается при следующей стратегии переключений телескопа:

- в начальный момент телескоп устанавливается в то из положений с $\theta = +\theta_0$ или $\theta = -\theta_0$, которое соответствует большему значению q (для случая, показанного на рис. 4, это положение $\theta = +38.4^\circ$);
- телескоп сохраняет это положение до момента первого пересечения кривых $q(t, +38.4^\circ)$ и $q(t, -38.4^\circ)$;
- в момент пересечения кривых телескоп устанавливается в положение с противоположным значением θ ;
- телескоп сохраняет новое положение до момента следующего пересечения кривых с $\theta = \pm 38.4^\circ$ и в момент пересечения меняет отклонение на противоположное и так далее.

Точность пересечения кривых, определенная по результатам численных расчетов, на основе которых построен рис. 13, конечна, это же относится к совпадению моментов пересечения кривых для разных γ_{cr} . Попробуем определить точное условие, при котором происходит пересечение кривых, т.е. моменты времени, в которые выполняется условие $q(t, \theta_0) = q(t, -\theta_0)$.

Рассмотрим зависимость доли наблюдательного времени $q(t)$ от ориентации телескопа и положения Солнца относительно плоскости орбиты МКС. Для этого введем прямоугольную систему координат, связанную с плоскостью орбиты станции. В этой системе координат ось визирования телескопа из-за орбитального движения МКС описывает конус, ось которого перпендикулярна плоскости орбиты, а угол полураствора равен $90^\circ - \theta$ (при $\theta > 0$ конус находится в север-

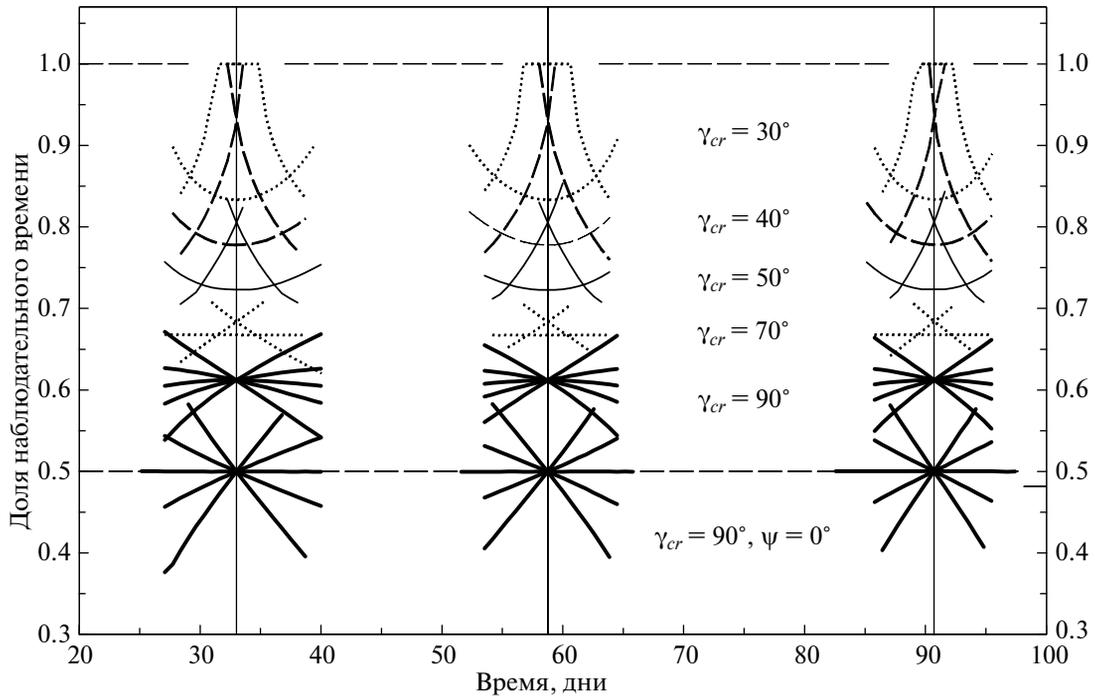


Рис. 13. Участки графиков $q(t)$ вблизи первых трех пересечений кривых для значений $\theta = 0^\circ$ и $\pm 38.4^\circ$. Самые нижние пересечения, показанные толстыми сплошными линиями, соответствуют $\gamma_{cr} = 90^\circ$ и $\psi = 0^\circ$. Остальные четыре группы пересечений соответствуют случаям $\psi = 60^\circ$ и $\gamma_{cr} = 90^\circ, 70^\circ, 50^\circ, 40^\circ$ и 30° (снизу вверх). Во всех пересечениях, кроме двух нижних групп, показаны по три кривые, соответствующие $\theta = 0^\circ$ и $\pm 38.4^\circ$. Две нижние группы (с $\gamma_{cr} = 90^\circ$) и содержат по пять пересекающихся линий. Промежуточные наклонные линии соответствуют $\theta = \pm 15^\circ$. Отметим, что все кривые с $\gamma_{cr} = 90^\circ$ пересекаются в одной точке. Кривые с $\gamma_{cr} = 90^\circ, 50^\circ$ и 40° пересекаются в разных точках и образуют “треугольники”, но пересечения кривых с $\theta = \pm 38.4^\circ$ в этих группах и в обеих группах с $\gamma_{cr} = 90^\circ$ происходят в один и тот же момент времени (показан вертикальной линией). Для $\gamma_{cr} = 30^\circ$ кривые с $\theta = \pm 38.4^\circ$ достигают максимального значения $q = 1$ раньше (позже), и вместо их пересечения возникает наложение. Для удобства горизонтальными штриховыми линиями показаны уровни $q = 0.5$ и 1.0 .

ном полушарии орбиты, при $\theta < 0$ — в южном, а при $\theta = 0$ — совпадает с ее плоскостью). Форма этого конуса не зависит от угла ψ . Наблюдения невозможны, когда угол между осью визирования телескопа и направлением на Солнце $\gamma < \gamma_{cr}$, т.е. если направление оси визирования лежит внутри конуса с полураствором γ_{cr} , ось которого направлена на Солнце. Значение q определяется пересечением этих двух конусов.

На рис. 14 изображена орбита МКС и указанные два конуса в тот момент, когда Солнце находится ниже плоскости орбиты МКС или точно в этой плоскости. Не снижая общности, будем полагать, что на рисунке Солнце находится в плоскости XOZ . На рисунке конусы пересекаются, линии их пересечения показаны штриховыми линиями, их проекции на плоскость орбиты — штрих-пунктирными линиями. Доля наблюдательного времени⁴ равна $q' = \angle AOB / 360^\circ$ (здесь

⁴ Пренебрегая изменением положения Солнца за время витка.

q' — доля наблюдательного времени без учета влияния тени Земли, рассмотренного в разделе 2.3).

Рассмотрим момент времени, когда Солнце пересекает плоскость орбиты. Обратим внимание, что картина, показанная на рис. 14, симметрична относительно плоскости орбиты, т.е. в этой конфигурации для любых θ выполняется равенство $q'(\theta) = q'(-\theta)$. Одновременно, по этой же причине одинаковы приращения q из-за влияния тени Земли: $\Delta(\theta, \psi) = \Delta(-\theta, \psi)$ при всех допустимых ψ . Поскольку $q(\theta, \psi) = q'(\theta) + \Delta(\theta, \psi)$, то выполняется и равенство $q(\theta, \psi) = q(-\theta, \psi)$.

Из этого можно сделать вывод, что все пары кривых $q(t, \theta, \psi)$ и $q(t, -\theta, \psi)$ пересекаются *точно* в моменты прохождения Солнца через плоскость орбиты МКС. Это объясняет одновременность пересечения групп кривых с разными значениями γ_{cr} , отмеченную при обсуждении рис. 13.

Отдельно отметим, что для “неэффективной” бленды ($\gamma_{cr} = 90^\circ$) величина $q' = 0.5$ и не зависит от угла θ . Очевидно, что при $\theta = 0^\circ$ ось визирова-

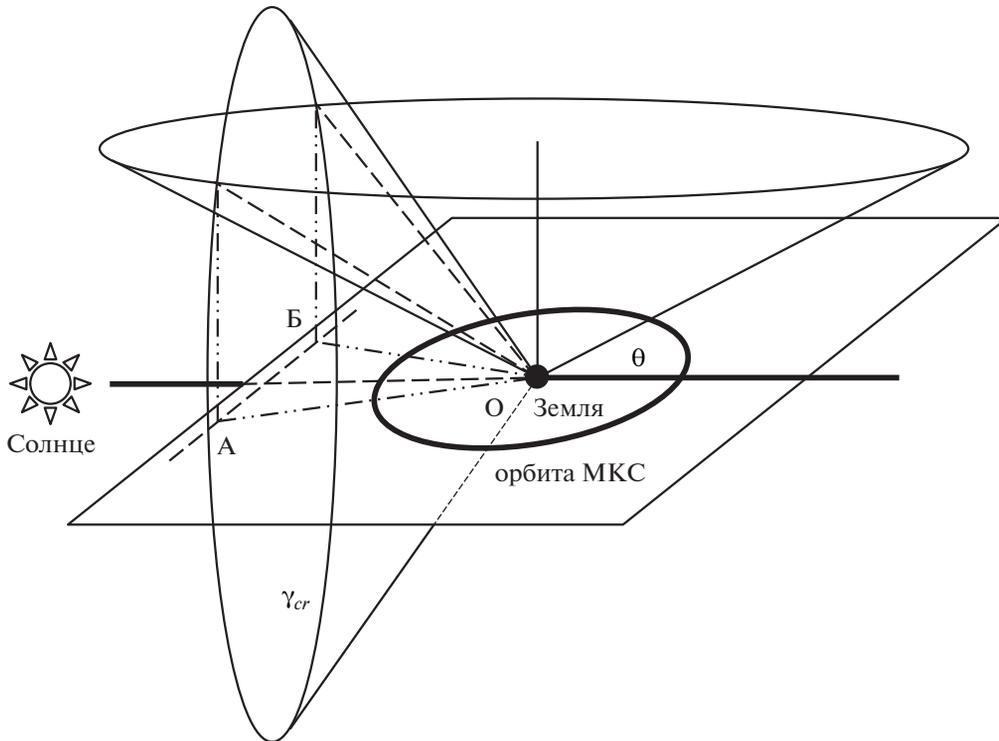


Рис. 14. Иллюстрация пересечения конуса, описываемого осью визирования телескопа при орбитальном движении МКС, с конусом засветки вокруг направления на Солнце, определяемым блендой телескопа. Ось визирования телескопа и направление на Солнце лежат по разные стороны от плоскости орбиты МКС, предельный случай – Солнце в плоскости орбиты.

ния телескопа становится ортогональной направлению на Солнце в двух диаметрально противоположных точках орбиты (положение этих точек относительно направления на Солнце определяется углом ψ). При отклонении оси визирования от плоскости орбиты на любой угол θ ортогональность сохраняется. Это объясняет отмеченный на рис. 14 факт пересечения *всех* кривых $q(t)$ для $\gamma_{cr} = 90^\circ$ в одной точке.

Также легко понять, что в конфигурации, показанной на рис. 14 (когда Солнце находится в плоскости орбиты или ниже ее), угол $\angle AOB$ монотонно уменьшается с ростом θ . В некоторый момент конусы на рисунке перестают пересекаться, и доля наблюдательного времени на витке достигает максимально возможного значения $q = 1$. Если Солнце находится в плоскости орбиты, то оси конусов перпендикулярны друг другу, и их касание происходит при $\gamma_{cr} = \theta$. Это показывает, что изменение характера пересечения кривых $q(t, \theta_0)$ и $q(t, -\theta_0)$ при малых рабочих углах бленды, показанное на 13, происходит при $\gamma_{cr} = \theta_0$, что подтверждает сделанное выше предположение.

Таким образом, оптимальной стратегией, обеспечивающей максимальную длительность наблюдательного времени (т.е. максимальное

значение $\langle q \rangle$), является установка телескопа с положение с $\psi = \psi_{max}$, перекладка его из положения $\theta = +38.4^\circ$ в положение $\theta = -38.4^\circ$ и обратно в моменты пересечения Солнцем плоскости орбиты МКС. Соответствующие кривые $q(t)$ для разных γ_{cr} приведены на рис. 15. На этом рисунке представлены кривые для $\psi = \psi_{max} = 60^\circ$ и для $\gamma_{cr} = 90^\circ, 70^\circ$ и 50° . На нижнем графике рис. 15 показаны кривая зависимости от времени угла ξ между направлением на Солнце и плоскостью орбиты МКС и график переключений телескопа. Средние значения долей наблюдательного времени $\langle q \rangle$ для $\psi = \psi_{max} = 60^\circ$ и для нескольких значений γ_{cr} приведены в табл. 3.

При $\gamma_{cr} \leq \theta_0$ наблюдения можно вести непрерывно⁵ ($\langle q \rangle = 1$). Это иллюстрирует рис. 14. В изображенной на нем конфигурации телескоп направлен в северное полушарие относительно орбиты ($\theta = +38.4^\circ$). Согласно описанному выше алгоритму переключений это положение телескоп занимает, когда Солнце находится южнее плоскости орбиты. В момент пересечения плоскости

⁵ Без учета выключения телескопа на периоды внекорабельной деятельности.

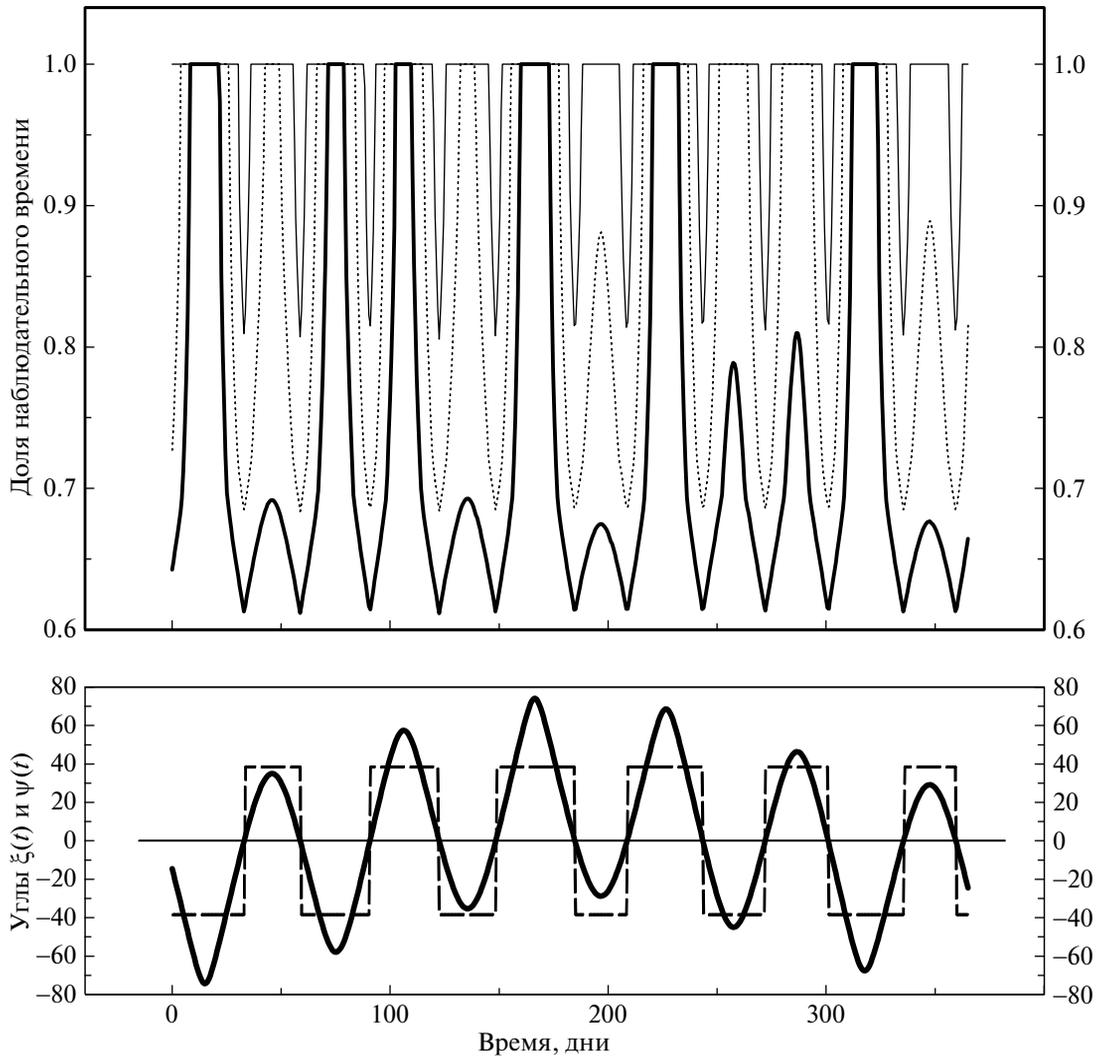


Рис. 15. На верхнем графике показана доля наблюдательного времени $q(t)$ за один год наблюдений для $\psi = 60^\circ$. Кривые соответствуют блендам с разной эффективностью: толстая сплошная кривая – $\gamma_{cr} = 90^\circ$, пунктирная линия – $\gamma_{cr} = 70^\circ$, тонкая сплошная линия – $\gamma_{cr} = 50^\circ$. Соответствующие средние значения $\langle q \rangle$ приведены в табл. 3. На нижнем графике: зависимость угла $\xi(t)$ между направлением на Солнце и плоскостью орбиты МКС (сплошная линия) и график оптимальных переключений телескопа $\theta(t)$ (штриховая линия). Переключения производятся в моменты, когда Солнце пересекает плоскость орбиты ($\xi(t) = 0$).

орбиты, показанный на рис. 14, Солнце занимает положение, наиболее близкое к конусу, описываемому осью визирования телескопа. В этот момент конусы, изображенные на рисунке, при

Таблица 3. Средняя доля наблюдательного времени за 1 год наблюдений в оптимальном режиме (переключки $\theta = \pm 38.4^\circ$, $\psi = 60^\circ$) в зависимости от предельного угла бленды γ_{cr} (без учета внекорабельной деятельности).

Предельный угол бленды γ_{cr}						
90°	80°	70°	60°	50°	40°	$\leq 38.4^\circ$
74%	81%	87%	93%	97.6%	99.8%	100%

$\gamma_{cr} = \theta_0$ касаются друг друга, что обеспечивает отсутствие потерь наблюдательного времени (т.е. $q = 1$). При любом положении Солнца строго ниже плоскости орбиты на рис. 14 отсутствие пересечения конусов сохраняется, и доля наблюдательного времени сохраняет максимальное значение $q = 1.0$.

Таким образом, при $\gamma_{cr} \leq \theta_0$, описанный выше режим наблюдения в положениях с $\theta = \pm \theta_0 = \pm 38.4^\circ$ обеспечивает непрерывное ведение наблюдений $q(t) = 1$.

При $\gamma_{cr} = \theta_0$ переключку телескопа необходимо проводить в момент t_\odot пересечения Солнцем

плоскости орбиты МКС (как и для всех случаев $\gamma_{cr} > 38.4^\circ$). При $\gamma_{cr} < 38.4^\circ$ вблизи этого момента времени кривые $q(t, +38.4^\circ)$ и $q(t, -38.4^\circ)$ не пересекаются, а накладываются друг на друга (см. верхние группы пересечений на рис. 13), соответственно переключку телескопа можно проводить не точно в момент t_0 , а в некотором интервале вблизи него.

При еще меньших значениях $\gamma_{cr} < \theta_0 - \varepsilon \approx 15.0^\circ$ Солнце никогда не засвечивает телескоп, установленный в положение с $\theta = \theta_0$ или $\theta = -\theta_0$. В этом случае переключки телескопа между крайними положениями $\theta = \pm\theta_0$ можно производить в произвольные моменты времени, ориентируясь только на равномерность покрытия небесной сферы наблюдениями. На рис. 12 это проявляется в том, что для $\gamma_{cr} < 15.0^\circ$ кривые $q(t, \pm 38.4^\circ)$ принимают вид прямых $q(t) = 1$.

Как уже отмечалось, эффективный угол бленды у телескопа “Лири-Б” скорее всего будет достаточно большим, поэтому последние два рассмотренных случая, обеспечивающих без учета внекорабельной деятельности $q = 1$, вряд ли будут реализованы. В этом случае переключки телескопа производятся в моменты пересечения Солнцем плоскости орбиты МКС, что дает следующую статистику: за год производится 12 переключек с интервалом порядка половины периода прецессии орбиты МКС между ними, но эти моменты идут не строго периодически. Минимальное время между переключками составляет 1950550 с (~22.8 сут.), максимальное – 3288070 с (~38.0 сут.). В среднем между переключками проходит 2630000 с (~30.4 сут.).

Уже при “неэффективной” бленде ($\gamma_{cr} = 90^\circ$) средняя доля наблюдательного времени в предложенной схеме наблюдений становится равной $\langle q \rangle = 74\%$, что заметно больше, чем в предложенной ранее сезонной схеме. Значения $\langle q \rangle$ для меньших величин углов γ_{cr} приведены в табл. 3.

4. РЕЖИМ ЧАСТЫХ ПЕРЕКЛАДОК ТЕЛЕСКОПА

Сразу ограничим рассмотрением режима частых переключек телескопа следующими предположениями:

1) помимо “частых” переключек производятся “редкие”, для них используется стратегия, предложенная в разделе 3, т.е. телескоп отклонен на угол $\theta = \pm\theta_0$, при этом Солнце и ось визирования телескопа лежат по разные стороны от плоскости орбиты МКС;

2) за орбитальный виток могут проводиться две “частые” переключки телескопа: первая переключка переводит телескоп из положения, соответствующего стратегии “редких” переключек ($\theta = \pm\theta_0, \psi = \psi_{max}$), в новое положение, а вторая переключка возвращает его в исходное положение;

3) телескоп находится в штатном положении максимально возможное время, т.е. первая переключка проводится в момент начала засветки, а обратная – в момент ее окончания в штатном положении.

Еще раз вернемся к рис. 14. Телескоп наклонен к орбите на угол θ , в штатном положении значение этого угла равно $\theta_0 = 38.4^\circ$, а Солнце находится в плоскости орбиты или ниже ее ($-(i + \varepsilon) = -76.0^\circ \leq \xi \leq 0^\circ$). Наблюдения будут невозможны из-за засветки Солнцем в следующем диапазоне орбитальных фаз МКС

$$\cos(\varphi - \varphi_0) > \frac{\cos \gamma_{cr} \cos \xi - \tan \xi \sin \theta + \cos \gamma_{cr} \tan \xi \sin \xi}{\cos \theta}, \quad (4)$$

здесь φ_0 – начало отсчета орбитальной фазы, которое выбирается в середине интервала засветки; $\Delta\varphi \equiv \varphi - \varphi_0$. (Вывод этой формулы опускаем.) Для предельного случая, когда Солнце находится в плоскости орбиты МКС ($\xi = 0^\circ$), формула (4) приобретает более простой вид

$$\cos \Delta\varphi > \frac{\cos \gamma_{cr}}{\cos \theta}. \quad (5)$$

Графики зависимости $\Delta\varphi(\xi)$ для разных значений γ_{cr} показаны на рис. 16. Конусы, показанные на рис. 14, не пересекаются, если $\theta + |\xi| > \gamma_{cr}$. Это условие начинает выполняться при большом удалении Солнца под плоскость орбиты для любого γ_{cr} , что объясняет выход на ноль всех кривых в левой части рис. 16.

Изменение положения телескопа может быть связано с изменением только угла θ , только угла ψ или обоих этих углов одновременно. Рассмотрим все эти возможности.

4.1. Переключки только по θ

Чтобы полностью избежать засветки, надо в момент начала засветки (на орбитальной фазе МКС $\Delta\varphi_1$ в соответствии с формулой (4)) переложить телескоп из штатного положения $\theta = \theta_0$ в более высокое $\theta_1 = \gamma_{cr} - |\xi|$, угол ψ не меняется. В исходное положение телескоп возвращается в

момент прекращения засветки в штатном положении (т.е. на орбитальной фазе $\Delta\varphi_2 = -\Delta\varphi_1$).

Следует заметить, что если угол θ_1 достаточно велик, то смазы изображений звезд станут неприемлемо велики или же нарушится режим ВЗН у матриц фокальной плоскости [31]. В этом случае телескоп отклоняется на максимально допустимый угол $\theta_2 < \theta_1$, при этом засветка будет иметь место, но будет короче, ее длительность описывается формулой (4) для $\theta = \theta_2$.

4.2. Перекладки только по ψ

В момент начала засветки в штатном положении телескоп переключается следующим образом: угол θ не меняется, по углу ψ телескоп перемещается из штатного положения $\psi_{\max} = 60^\circ$ в положение $\psi_{\min} \approx -15^\circ$ (см. раздел 2.3), т.е. направление оси телескопа меняется на $\Delta\psi \approx 75^\circ$. В исходное положение телескоп возвращается в момент прекращения засветки в штатном положении. Орбитальные фазы моментов переключений задаются формулой (4).

В новом положении засветки не будет, если $\Delta\psi > 2\Delta\varphi$ (более того, в этом случае поворот телескопа можно уменьшить до $\Delta\psi = 2\Delta\varphi$). Если указанное неравенство не выполняется, то засветка будет присутствовать, но ее длительность составит $2\Delta\varphi - \Delta\psi$.

При перемещении только по углу ψ ось визирования телескопа продолжает двигаться по тому же кругу небесной сферы, что и до перекладки. Таким образом, часть звезд в полосе сканирования будет пронаблюдена два раза за один орбитальный виток.

3. Перекладки по θ и ψ одновременно

Изменение обоих углов ориентации телескопа позволяет добиться уменьшения потерь наблюдательного времени, по сравнению с перекладками только по θ или только по ψ . Изменение угла θ позволяет избежать двойного сканирования звезд, описанного в предыдущем подразделе.

5. ЧИСЛО ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ЗВЕЗД

Прецессия орбиты МКС сдвигает полосу сканирования на каждом витке, но скорость ее невелика, и любые точки на небе попадают в полосу сканирования несколько раз подряд. Число попаданий точки в полосу сканирования зависит от ее склонения δ , наклона оси визирования телескопа



Рис. 16. Зависимость орбитальной фазы начала засветки от удаления Солнца от плоскости орбиты МКС $\Delta\varphi(\xi)$ для блендов разными γ_{cr} . Кривые (снизу вверх) соответствуют значениям $\gamma_{cr} = 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ$ и 90° . В левой части всех кривых присутствуют горизонтальные участки, где нет засветки ($\Delta\varphi = 0$), которые тянутся до максимально возможного удаления Солнца от плоскости орбиты МКС $\xi_{\max} = -76.0^\circ$.

к плоскости орбиты МКС θ , а также от ширины поля зрения телескопа w .

Рассмотрим рис. 17. Горизонтальная плоскость на нем, а также соответствующий ей большой круг — плоскость орбиты МКС. Северный полюс орбиты (пересечение нормали к орбите с северным полушарием небесной сферы) обозначен буквой Z . Ось визирования телескопа отклонена на угол θ от плоскости орбиты. Полоса сканирования шириной $w \approx 1^\circ$ показана в верхней полусфере, ось визирования описывает малый круг, проходящий по середине полосы. Плоскость этого круга параллельна плоскости орбиты МКС.

Наклонные параллельные круги — небесный экватор и малые круги с $\delta = \text{const}$, описываемые звездами. Их плоскости наклонены к плоскости орбиты на угол $i = 51.6^\circ$. Северный полюс мира обозначен буквой N , он отстоит от полюса орбиты Z на тот же угол i .

С плоскостью орбиты связана система координат, одна из осей которой проходит через линию пересечения плоскостей орбиты и экватора. На рис. 17 плоскость орбиты неподвижна, а экваториальная система координат, привязанная к неподвижным звездам, вращается с периодом прецессии орбиты МКС P . Из-за этого вращения звезда попадает в полосу сканирования, а затем покидает ее, в этот интервал времени она будет на

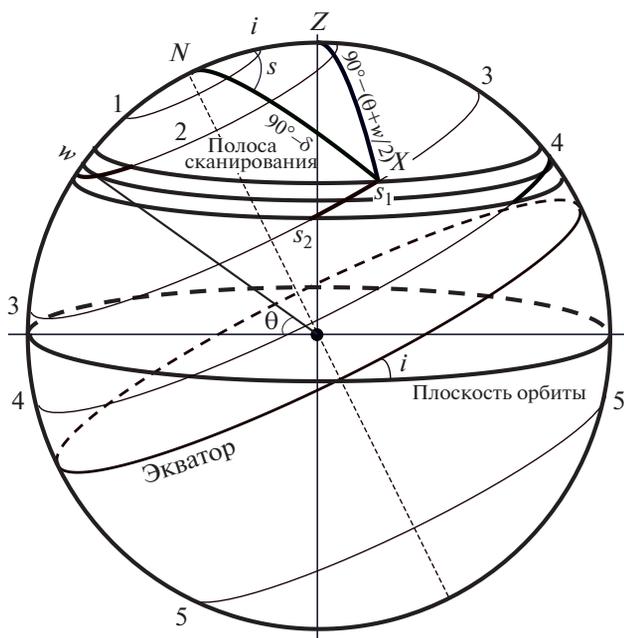


Рис. 17. Иллюстрация к оценке времени попадания звезды в полосу сканирования. Горизонтальные круги – плоскость орбиты МКС, середина и края полосы сканирования, наклонные круги – небесный экватор и малые круги, описываемые звездами. NZX – основной параллактический треугольник. Малые круги, различающиеся по типу пересечения с полосой сканирования, помечены цифрами от 1 до 5.

нескольких орбитальных витках подряд попадать в поле зрения телескопа “Лира-Б”.

Возможны пять ситуаций прохождения звезды через полосу сканирования, все они показаны на рис. 17 и обозначены цифрами 1–5. Звезды вблизи полюсов, вблизи кругов (1) и (5) вообще не попадают в полосу сканирования. Большая часть звезд (3) пересекает полосу сканирования дважды в симметричных точках. Поскольку рис. 17 симметричен относительно плоскости, проходящей через ось мира и точку Z , длительность обоих пересечений одинакова. Еще две группы звезд (2) и (4) не пересекают полосу сканирования полностью, они входят в полосу через одну из ее границ и выходят через эту же границу.

Рис. 17 соответствует ситуации, когда полюс мира лежит выше полосы сканирования, т.е. $|\theta| < \theta_0 - w/2 = 37.9^\circ$.

Оценим время пребывания звезды в полосе сканирования. Выберем звезду X со склонением δ , и рассмотрим параллактический сферический треугольник NZX . Две стороны этого треугольника постоянны и равны $NZ = i$, $NX = 90^\circ - \delta$, а сторона ZX и угол $s = \angle ZNX$ меняются со временем из-за прецессии.

Запишем теорему косинусов для этого треугольника [33]:

$$\cos ZX = \cos NZ \cos NX + \sin NZ \sin NX \cos s,$$

отсюда получаем выражение для угла s

$$\cos s = \frac{\cos ZX - \cos NZ \cos NX}{\sin NZ \sin NX}.$$

Рассмотрим случай (3). В момент t_1 пересечения верхней границы полосы сканирования третья сторона параллактического треугольника будет равна $ZX_1 = 90^\circ - \theta - w/2$, а в момент t_2 пересечения нижней границы соответственно $ZX_2 = 90^\circ - \theta + w/2$.

Учитывая длины остальных сторон треугольника, получаем:

$$\cos s_1 = \frac{\sin(\theta + w/2) - \cos i \sin \delta}{\sin i \cos \delta},$$

$$\cos s_2 = \frac{\sin(\theta - w/2) - \cos i \sin \delta}{\sin i \cos \delta}.$$

Соответственно получаем

$$\Delta s = s_2 - s_1 = \arccos \frac{\sin(\theta - w/2) - \cos i \sin \delta}{\sin i \cos \delta} - \arccos \frac{\sin(\theta + w/2) - \cos i \sin \delta}{\sin i \cos \delta},$$

а время пересечения полосы составит $\delta t = (\Delta s / 2\pi)P$.

Если при $s = 0^\circ$ сторона треугольника ZX лежит в интервале

$$90^\circ - \theta - w/2 < ZX < 90^\circ - \theta + w/2,$$

мы имеем случай (2). В этот момент треугольник вырождается в линию и выполняется соотношение $NX = ZX + i$, откуда следует ограничение на склонение δ . Если ZX попадает в этот интервал при $s = 180^\circ$, то имеем случай (4). Для него треугольник также вырождается, с выполнением соотношения $NX = ZX - i$ и ограничением на δ . В итоге получаем следующие соотношения

$$\delta t = \frac{P}{360^\circ} \begin{cases} \text{Не наблюдаются} & (1) \\ \text{при } (\theta + w/2) + i < \delta \leq 90^\circ. & (1) \\ 2(180^\circ - s_1) & (2) \\ \text{при } (\theta - w/2) + i < \delta < & (2) \\ < (\theta + w/2) + i; & \\ s_2 - s_1 & \text{при } (\theta + w/2) - i < \delta < & (3) \\ < (\theta - w/2) + i; & \\ 2(s_1 - 0^\circ) & \text{при } (\theta - w/2) - i < & (4) \\ < \delta < (\theta + w/2) - i; & \\ \text{Не наблюдаются} & (5) \\ \text{при } -90^\circ \leq \delta < (\theta - w/2) - i. & \end{cases}$$

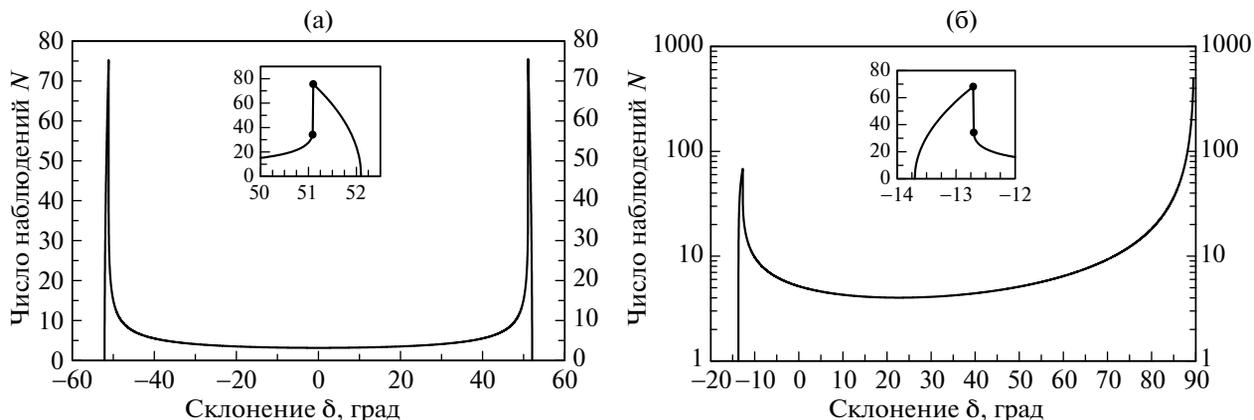


Рис. 18. Зависимость числа последовательных наблюдений звезды от ее склонения δ для а) $\theta = 0^\circ$; б) $\theta = 38.4^\circ$. На рисунке (а) минимум $N = 3$ достигается при $\delta = 0^\circ$, а максимумы $N = 75$ при $\delta = \pm 51.1^\circ$. На рисунке (б) минимум $N = 4$ достигается при $\delta = 22.7^\circ$, локальный максимум $N = 68$ при $\delta = -12.7^\circ$, резкое повышение N вблизи $\delta \approx 90^\circ$ — попадание полюса в полосу сканирования. Во врезках в увеличенных масштабах показаны пики (а) вблизи $\delta = 51^\circ$ (второй пик вблизи $\delta = -51^\circ$ — симметричен), (б) вблизи $\delta = -13^\circ$. У максимумов пиков наблюдаются скачки (разрывы) ровно в 2 раза, связанные с переходом от звезд типа (3) (согласно рис. 17), которые пересекают полосу сканирования два раза, к звездам типов (2) или (4), где наблюдается одно пересечение вдвое большей длины. Значения на краях разрыва отмечены черными кружками. Врезки даны в линейных шкалах.

Номера в строках этой формулы соответствуют вариантам, указанным на рис. 17. Заметим, что для случаев (2) и (4) приведено время от момента вхождения в полосу сканирования до выхода из нее, которое совпадает с полным временем пребывания в полосе сканирования за период прецессии, а для случая (3) — время пересечения полосы сканирования, которых за период прецессии происходит два (с равной длительностью), соответственно, полное время пребывания в полосе сканирования за период прецессии для случая (3) равно $2 \cdot \delta t$.

Рис. 17 построен для $|\theta| < \theta_0 - w/2$, но все полученные соотношения верны и для случая $|\theta| > \theta_0 + w/2$. В случае $\theta_0 - w/2 < |\theta| < \theta_0 + w/2$, когда в полосу сканирования попадает один из полюсов мира, вблизи него возникает область радиусом $r = w/2 - |\theta_0 - \theta|$, объекты внутри которой не покидают полосу сканирования никогда (формально $\delta t = P$).

От длительности пребывания в полосе сканирования δt легко перейти к среднему числу последовательных наблюдений точки (объекта):

$$\langle N \rangle = \delta t / P_{\text{orb}}.$$

В общем случае значение $\langle N \rangle$ будет дробным, в то время как число последовательных наблюдений объекта N — целое, по определению. Это означает, что часть объектов, расположенных на малом круге с заданным склонением δ , к которому относится величина $\langle N \rangle$, будет наблюдаться

$N = [\delta t / P_{\text{orb}}]$, а остальные — $N + 1$ раз (здесь скобки [...] означают взятие целой части числа). Например, при $\langle N \rangle = 4.25$, 75% объектов будут наблюдаться по 4 раза, а оставшиеся 25% — по 5 раз подряд.

Графики зависимости $\langle N \rangle(\delta)$ представлены на рис. 18 для углов отклонения $\theta = 0^\circ$ и 38.4° соответственно. График для $\theta = -38.4^\circ$ симметричен графику с $\theta = +38.4^\circ$ относительно вертикальной линии $\delta = 0^\circ$. На графике, соответствующем углу отклонения 38.4° , масштаб по вертикальной оси логарифмический.

Плотность покрытия неба наблюдениями однозначно связана с числом наблюдений точки небесной сферы на последовательных витках. Покрытие неба будет осесимметричным относительно оси мира, отклонения от симметрии будут связаны с конечной длительностью эксперимента и с выключением телескопа на периоды внекорабельной деятельности экипажа МКС. Зависимость покрытия неба от склонения δ является суммой распределений, показанных на рис. 18а и 18б (для $\theta = -38.4^\circ$ — зеркально симметричный относительно вертикальной оси) с весами, пропорциональными длительности наблюдений в каждом из положений. Для оптимальной стратегии, в которой по 50% наблюдений проводятся при $\theta = \theta_0$ и $-\theta_0$, зависимость числа покрытий неба за один год наблюдений показана на рис. 19.

Поскольку в этой стратегии полоса сканирования всегда проходит через один из полюсов мира, они будут наблюдаться на каждом витке на кото-

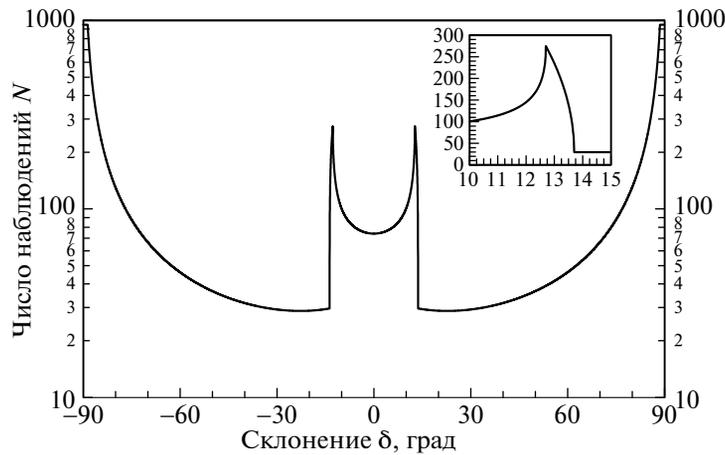


Рис. 19. Среднее число наблюдений точки неба за один год при оптимальной стратегии с “неэффективной” блендой в зависимости от склонения δ (без учета внекорабельной деятельности на МКС). Во врезке в увеличенном масштабе показан пик вблизи $\delta = 14^\circ$ (второй пик вблизи $\delta = -14^\circ$ — симметричен). В пиках нет скачков, наблюдающихся на рисунках 18. Врезка дана в линейных шкалах.

ром ведутся наблюдения. По мере удаления от полюса плотность наблюдений быстро падает. В области $-14^\circ < \delta < +14^\circ$, где наблюдения возможны при обоих положениях телескопа, плотность наблюдений более высокая. Кроме того, при $\delta = \pm 14^\circ$ полоса сканирования проходит вдоль круга склонения, поэтому на этих склонениях наблюдается резкий подъем плотности покрытия наблюдениями.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам проделанной работы можно сделать следующие выводы.

Найдена стратегия сканирования неба, обеспечивающая максимальную долю наблюдательного времени. Она имеет следующий вид: телескоп отклоняется от плоскости орбиты МКС на угол $\theta = \pm\theta_0 = \pm 38.4^\circ$, при этом ось визирования телескопа и Солнце должны находиться по разные стороны от плоскости орбиты. Перевод телескопа из одного из этих положений в другое осуществляется в момент пересечения Солнцем плоскости орбиты МКС (примерно 1 раз в месяц). В плоскости орбиты телескоп максимально отклоняется от локального зенита $\psi = \psi_{\max} = 60^\circ$.

Даже при “неэффективной” бленде телескопа при такой стратегии доля наблюдательного времени составляет 74%, в предлагавшихся ранее стратегиях наблюдений эта доля составляла 53%–58%. При использовании более эффективных бленд доля наблюдательного времени возрастает, значения приведены в табл. 3.

При описанной стратегии сканирования неба любой объект, попавший в поле зрения телескопа, наблюдается на нескольких орбитальных витках подряд. Минимальное число последовательных наблюдений равно 4 и достигается для $\delta = +23^\circ$ при отклонении телескопа к северу от плоскости орбиты и для $\delta = -23^\circ$ при отклонении к югу. Также имеется локальный максимум числа последовательных наблюдений, равный 68 на краю сканируемого сегмента (для $\delta = -14^\circ$ при отклонении телескопа к северу и для $\delta = +14^\circ$ при отклонении к югу).

Один из полюсов мира и область 0.5° вокруг него (половина ширины поля зрения телескопа) сканируются на каждом орбитальном витке, пока телескоп не изменяет своего положения. Поскольку средний интервал времени между переключками составляет примерно 1 мес., объекты в этой области будут наблюдаться примерно 500 раз подряд.

Следует обсудить еще два момента. Отклонение телескопа позволяет увеличить длительность наблюдений, при этом изображения звезд будут смазываться (см. подраздел 1.3.3). Для задач, в которых будет использоваться фотометрическая или цветовая информация, получаемая в КЭ “Лира-Б” (например, [8–10, 14–16, 19, 20, 23–26, 30]), влияние смаза не очень существенно. Однако для задач астрометрического толка (измерение координат звезд, астероидов, конфигурации спутников планет-гигантов [35, 36]), а также в задачах, рассмотренных в [6, 7, 11, 13, 17, 18, 21], смаз может ухудшить ожидаемые результаты. Возможно, для решения задач астрометрии необ-

ходимо ввести дополнительные сеансы наблюдений в плоскости орбиты ($\theta = 0^\circ$), несмотря на потери наблюдательного времени.

Второй момент, требующий обсуждения, также связан со смазами изображений. В настоящей работе в качестве критерия была выбрана полная длительность наблюдательного времени. Сигнал от звезды в смазанном и резком изображениях одинаков при равной длительности экспозиции, но смазанное изображение занимает большее число пикселей, при их считывании регистрируется больший шум. Одновременно скорость сканирования по малому кругу ниже, чем по большому (в плоскости орбиты), что увеличивает длительность экспозиции у смазанных изображений. Вероятно, более корректным было бы использовать интегральный критерий, основанный на достижении максимума отношения сигнала к шуму в изображениях звезд, однако такой критерий необходимо корректно сформулировать. Этот критерий будет зависеть не только от ориентации телескопа и параметров бленды, но и от характеристик и режимов работы матричных приемников излучения телескопа “Ли́ра-Б”. Мы планируем проведение такого анализа в ближайшее время.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят А.И. Захарова за ценные замечания и внимательное прочтение черновика статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Создание комплекса научной аппаратуры (КНА) “Многоцветного фотометрического обзора неба” (МФОН). Пояснительная записка к эскизному проекту. Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2010.
2. А. И. Захаров, А. О. Жуков, А. В. Миронов, Б. П. Паченко, М. Е. Прохоров, О. Ю. Стекольников и М. С. Тучин, *Создание комплекса научной аппаратуры многоцветного фотометрического обзора неба* (М.: Аналитический центр, 2018).
3. А. И. Захаров, А. О. Жуков, А. В. Миронов, М. Е. Прохоров и О. Ю. Стекольников, в сб.: *Астрономия-2018. Современная звездная астрономия 2018* (М.: ИЗМИРАН) **1**, 172 (2018).
4. A. Mironov, A. Zakharov, M. Prokhorov, in *The Science of Calibration*, eds S. Deustua, S. Allam, D. Tucker, J. A. Smith, ASP Conf. Ser. **503**, 123 (2016).
5. A. I. Zakharov, A. V. Mironov, F. N. Nikolaev, M. E. Prokhorov, and M. S. Tuchin, *Astronomische Nachrichten* **334**, 823 (2013).
6. V. M. Lipunov and M. E. Prokhorov, *Astrophys. and Space Sci.* **98**, 221 (1984).
7. V. M. Lipunov, S. N. Nazin, E. Yu. Osminkin, and M. E. Prokhorov, *Astron. and Astrophys.* **282**, 61 (1994).
8. V. M. Lipunov, S. N. Nazin, I. E. Panchenko, K. A. Postnov, and M. E. Prokhorov, *Astron. and Astrophys.* **298**, 677 (1995).
9. N. A. Gorynya, A. S. Rastorguev, and N. N. Samus, *Astronomy Letters* **22**, 33 (1996).
10. E. V. Glushkova, M. V. Zabolotskikh, A. S. Rastorguev, I. M. Uglova, and A. A. Fedorova, *Astronomy Letters* **23**, 71 (1997).
11. N. I. Shakura, K. A. Postnov, and M. E. Prokhorov, *Astron. and Astrophys.* **331**, L37 (1998).
12. N. I. Shakura, N. A. Ketsaris, M. E. Prokhorov, and K. A. Postnov, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **300**, 992 (1998).
13. N. I. Shakura, M. E. Prokhorov, K. A. Postnov, and N. A. Ketsaris, *Astron. and Astrophys.* **348**, 917 (1999).
14. O. K. Sil'chenko, V. L. Afanasiev, V. H. Chavushyan, J. R. Valdes, *Astrophys. J.* **577**, 668 (2002).
15. S. Karpov, D. Bad'in, G. Beskin, A. Biryukov, S. Bondar, et al., *Astronomische Nachrichten* **325**, 677 (2004).
16. V. S. Kozyreva and A. I. Zakharov, *Astronomy Letters* **32**, 313 (2006).
17. D. Klochkov, R. Staubert, K. Postnov, N. Shakura, A. Santangelo, et al., *Astron. and Astrophys.* **482**, 907 (2008).
18. M. S. Pshirkov and S. B. Popov, *J. Exp. Theor. Phys.* **108**, 384 (2009).
19. O. K. Sil'chenko, A. V. Moiseev, and V. L. Afanasiev, *Astrophys. J.* **694**, 1550 (2009).
20. N. N. Samus, E. V. Kazarovets, O. V. Durlevich, N. N. Kireeva, and E. N. Pastukhova, *VizieR On-line Data Catalog: B/gcvs* (2009).
21. M. Revnivtsev, K. Postnov, A. Kuranov, and H. Ritter, *Astron. and Astrophys.* **526**, A94, (2011).
22. A. Chashkina and S. B. Popov, *New Astron.* **17**, 594 (2012).
23. A. K. Dambis, A. S. Rastorguev, and M. V. Zabolotskikh, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **439**, 3765 (2014).
24. A. V. Mironov, A. I. Zakharov, V. G. Moshkaley, O. Yu. Malkov, and E. Yu. Kilpio, *Baltic Astron.* **23**, 286 (2014).
25. D. Chulkov, M. Prokhorov, O. Malkov, S. Sichevskij, N. Krussanova, A. Mironov, A. Zakharov, and A. Kniazev, *Baltic Astron.* **24**, 137 (2015).
26. K. A. Postnov, M. I. Gornostaev, D. Klochkov, E. Laplace, V. V. Lukin, and N. I. Shakura, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **452**, 1601 (2015).
27. G. M. Beskin, S. V. Karpov, A. V. Biryukov, S. F. Bondar, E. A. Ivanov, et al., *Astrophys. Bull.* **72**, 81 (2017).
28. K. V. Sokolovsky, P. Gavras, A. Karampelas, S. V. Antipin, I. Bellas-Velidis, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **464**, 274 (2017).
29. П. А. Кузнецов, И. С. Моцев и С. С. Хромов, *Успехи прикладной физики.* **1**, № 5, 606 (2013).

30. *A. I. Zakharov, A. V. Mironov, M. E. Prokhorov, A. V. Biryukov, O. Yu. Stekol'shchikov, and M.S. Tuchin*, *Astronomy Reports* **57**, 195 (2013).
31. *M. E. Prokhorov, A. I. Zakharov, A. V. Mironov, A. V. Biryukov, O. Yu. Stekol'shchikov, et al.*, *Baltic Astronomy* **24**, 92 (2015).
32. *А. И. Захаров, М. Е. Прохоров, М. С. Тучин*, в сб. *Инновационные решения для космической механики, физики, астрофизики, биологии и медицины*, под ред. В. А. Садовниченко, А. И. Григорьева, М. И. Панасюка, (М.: МГУ) 44 (2018).
33. *В. Е. Жаров*, *Сферическая астрономия* (Фрязино: Век2, 2006).
34. *Российский сегмент МКС. Справочник пользователя* (Королев: РКК "Энергия", 2018).
35. *J.-E. Arlot, W. Thuillot, C. Ruatti, A. Ahmad, F. Amossé et al.*, *Astron. and Astrophys.* **493**, 1171 (2009).
36. *N. V. Emelianov*, *Solar System Research* **37**, 314 (2003).