



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 72 за 2018 г.



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

**Еленин Л.В., Молотов И.Е.,
Боровин Г.К.**

Эффективное планирование
наблюдений космических
объектов на орбитах
различных типов

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Еленин Л.В., Молотов И.Е., Боровин Г.К. Эффективное планирование наблюдений космических объектов на орбитах различных типов // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2018. № 72. 18 с. doi:[10.20948/prepr-2018-72](https://doi.org/10.20948/prepr-2018-72)
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2018-72>

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

Л.В. Еленин, И.Е. Молотов, Г.К. Боровин

**Эффективное планирование
наблюдений космических объектов
на орбитах различных типов**

Москва — 2018

Еленин Л.В., Молотов И.Е., Боровин Г.К.

Эффективное планирование наблюдений космических объектов на орбитах различных типов.

В данной работе рассмотрена концепция создания перспективного программного комплекса автоматизированного планирования наблюдений для сети оптических телескопов. Особое внимание уделено вопросам увеличения эффективности как поисковых (обзорных), так и комбинированных наблюдений искусственных космических объектов на различных типах орбит.

Ключевые слова: астрономия, планирование, космические аппараты, космический мусор

Leonid Vladimirovich Elenin, Igor Evgenevich Molotov, Gennady Konstantinovich Borovin

Effective planning of observations of space objects on different types of orbits.

In this paper we review the concept of prospective software package for the automated planning of observations for an optical telescope network. Special attention to issues of more effective survey planning and combined observations of artificial space objects on different types of orbits.

Key words: astronomy, planning, spacecrafts, space debris

Оглавление

Введение	3
1. Основные принципы проведения позиционных наблюдений	4
2. Создание карты плотностей космических объектов	5
3. Расчёт положения космических объектов на небесной сфере	6
4. Моделирование эффекта наблюдательной селекции	7
5. Переход к карте эффективности обнаружения космических объектов	13
6. Комбинированный режим наблюдений	14
7. Автоматическая генерация плана наблюдений	15
Библиографический список	19

Введение

Задача создания системы автоматизированного планирования наблюдательных программ тесно связана с работой по увеличению общей эффективности работы как отдельно взятого наблюдательного пункта (НП), так и сети наблюдательных средств в целом. Централизованный подход к планированию позволит более рационально распределять главный ресурс наблюдательных средств — их наблюдательное время. Сама задача эффективного планирования может быть оценена как количеством позиционных измерений космических объектов (КО) за одну серию наблюдений (проводку) или наблюдательную ночь, так и по количеству обнаруживаемых новых объектов. В следующем разделе мы опишем основные принципы проведения позиционных наблюдений, т.е. наблюдений, служащих для дальнейшего определения положения КО на проекции небесной сферы и расчета его орбиты.

Стоит заметить, что эффективное планирование и успешное наблюдение КО тесно связано с типом его орбиты. Более детально данный аспект планирования будет описан в рамках этой работы.

Создаваемый программный комплекс автоматизированного планирования (ПКАП) базируется на идеях, описанных в данном препринте. ПКАП является кроссплатформенным решением, которое может быть развернуто на широком спектре операционных систем, включая семейство Microsoft Windows, различные дистрибутивы Linux, MacOS.

Программный комплекс создается с использованием объектно-ориентированного языка программирования высокого уровня C# и кроссплатформенной среды .NET Core.

Основой ПКАП является создание карты плотностей КО на небесной сфере, рассчитанной на текущую наблюдательную ночь, для конкретного НП. Помимо основной карты плотностей КО, могут быть использованы вспомогательные параметры, моделирующие собой эффект наблюдательной селекции, что позволит более эффективно распределять ограниченное наблюдательное время на текущую и последующие наблюдательные ночи для конкретного НП. Выбрать именно те области небесной сферы, где не только высока расчетная плотность наблюдаемых КО, но и велика сама вероятность их детектирования автоматизированными программными комплексами обработки изображений. Мы ещё вернемся к этому вопросу в соответствующем разделе.

Результатом работы ПКАП будет являться автоматизированное создание формализованных заданий на наблюдения, индивидуальных для каждого НП, с учетом их характеристик.

1 Основные принципы проведения позиционных наблюдений

Основной задачей позиционных или астрометрических наблюдений является определение местоположения небесных тел и векторов их скоростей на эпоху наблюдений. Результатом обработки первичных данных является определение небесных экваториальных координат целевого объекта (прямое восхождение α и склонение δ) и его собственного движения (т.е. его экваториальной скорости по прямому восхождению и склонению $\dot{\alpha}$, $\dot{\delta}$). Дополнительная фотометрическая редукция (определение светового потока) позволяет оценить блеск целевого объекта в звездных величинах. В рамках данной статьи мы не будем рассматривать методы решения астрометрической и фотометрической задач, так как они относятся к задачам, выполняемым программными комплексами обработки данных, а не планирования наблюдений.

Итак, основной целью проведения позиционных наблюдений в рамках нашей задачи является расчет положения целевого объекта или объектов, их идентификации и построения либо уточнение орбит. Оптические наблюдения проводятся либо с использованием априорной информации (целеуказания), либо осуществляется поиск и измерения всех движущихся объектов, попавших в поле зрения телескопа. Эти задачи могут комбинироваться, т.е. оптическое средство может выполнять свободный поиск новых объектов, пока не будут выполнены оптимальные условия наблюдения объекта по ЦУ — к примеру, минимизирован фазовый угол, увеличен угол места наблюдения, углового расстояния от галактического экватора. Влияние всех этих параметров на эффективность наблюдений будет рассмотрено далее.

Наблюдения по ЦУ могут проводиться в режиме сопровождения целевого объекта, когда телескоп компенсирует собственную скорость КО, тем самым позволяя эффективно накапливать сигнал, а также в режиме остановленного ведения или ведения со звездной скоростью (часовое ведение), если режим сопровождения технически не реализуем на наблюдательном средстве. Каждая серия наблюдений, называемая проводкой, состоит из нескольких последовательных экспозиций, либо с некоторой заданной задержкой между смежными экспозициями. Обычно используется режим с 8-12 экспозициями. Для увеличения дуги наблюдений, т.е. интервала времени между первым и последним измерением целевого КО, в течение наблюдательной ночи выполняют несколько проводок для одного целевого объекта. Если орбита КО плохо определена, вместо одной проводки проводят съемку серии проводок, покрывающих эллипс неопределенности положения целевого КО (рис. 1).

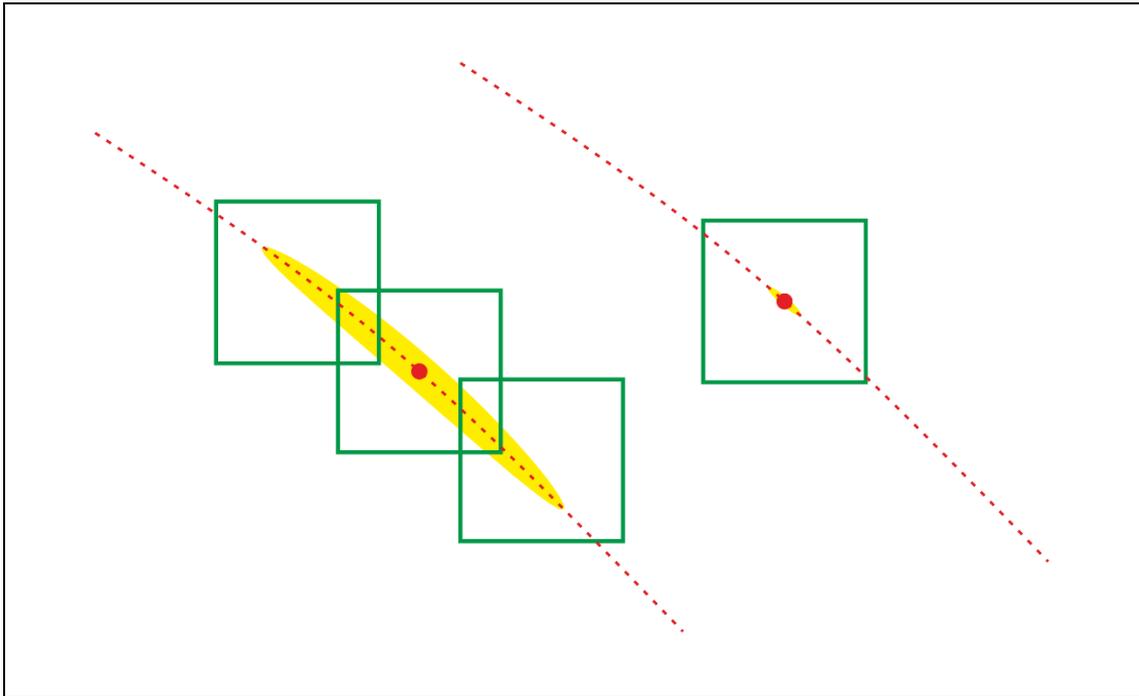


Рис. 1. Наблюдение КО по ЦУ с разной неопределенностью положения

При работе в поисковом или обзорном режиме область поиска разбивается на наблюдательные площадки, равные полю зрения телескопа или чуть меньшие поля зрения, для обеспечения незначительного перекрытия смежных площадок. Обычно используется такое же количество экспозиций, как и при работе по ЦУ. Наблюдения могут проводиться с различными режимами ведения телескопа, соответствующими различным типам орбит целевых КО. ПКАП позволит автоматически высчитывать среднюю угловую скорость КО в заданной области неба, что должно повысить проникание оптических средств, т.е. возможность детектирования объектов с меньшим блеском.

2 Создание карты плотностей космических объектов

Основой всех расчетов является создание карты плотностей КО. ПКАП производит анализ топоцентрического положения объектов на проекции небесной сферы за определённый временной интервал (наблюдательная ночь) с заданным временным шагом. Расчеты могут быть применены для КО находящихся на различных типах орбит. В ходе расчётов создается числовой массив распределения плотности космических объектов. Карта распределения представляет собой сетку (размер ячеек задается индивидуально, в настройках для каждого НП), наложенную на проекцию небесной сферы, представленную во второй экваториальной системе координат (прямое восхождение выражено в часовом измерении).

Исходя из описания становится понятно, что данная карта учитывает не только пространственную, но и временную составляющую – плотность объектов будет выше там, где угловая скорость КО минимальна, т.е. временной

интервал нахождения объекта в заданной области небесной сферы (ячейке сетки) максимален. Данный вывод особенно важен для планирования наблюдений КО, находящихся на высокоэллиптических орбитах (ВЭО).

В отличие от других типов КО, угловые скорости ВЭО вблизи перигея и апогея сильно разнятся. Наблюдение подобных КО в перигейной области сопряжено не только с техническими трудностями режима высокоскоростного сопровождения телескопом наблюдаемого объекта, снижением проникающей способности телескопа, ввиду сильно ограниченной по времени экспозиции, но и ошибками измерений вдоль орбиты, вызванными неминуемыми погрешностями регистрации времени начала экспозиции.

3 Расчет положения КО на небесной сфере

Для расчета положения КО используются аналитические модели SGP4/SDP4, для орбит, заданных в формате NORAD TLE (two-line elements), либо модель Prognoz-T (Титенко В.В.), для орбит, заданных в формате «Форма 200».

Для каждого заданного временного интервала производится расчет положения всех КО на небесной сфере во второй экваториальной системе координат, после чего для каждой ячейки сетки рассчитывается кумулятивное значение всех КО находившихся в данной области. По окончании расчетов получаем двумерный массив со значениями прямого восхождения и склонения, который будет визуализирован в ходе дальнейшей работы, с возможностью наложения дополнительных слоев, моделирующих действие эффекта наблюдательной селекции, к объяснению которой мы перейдем в следующем пункте.

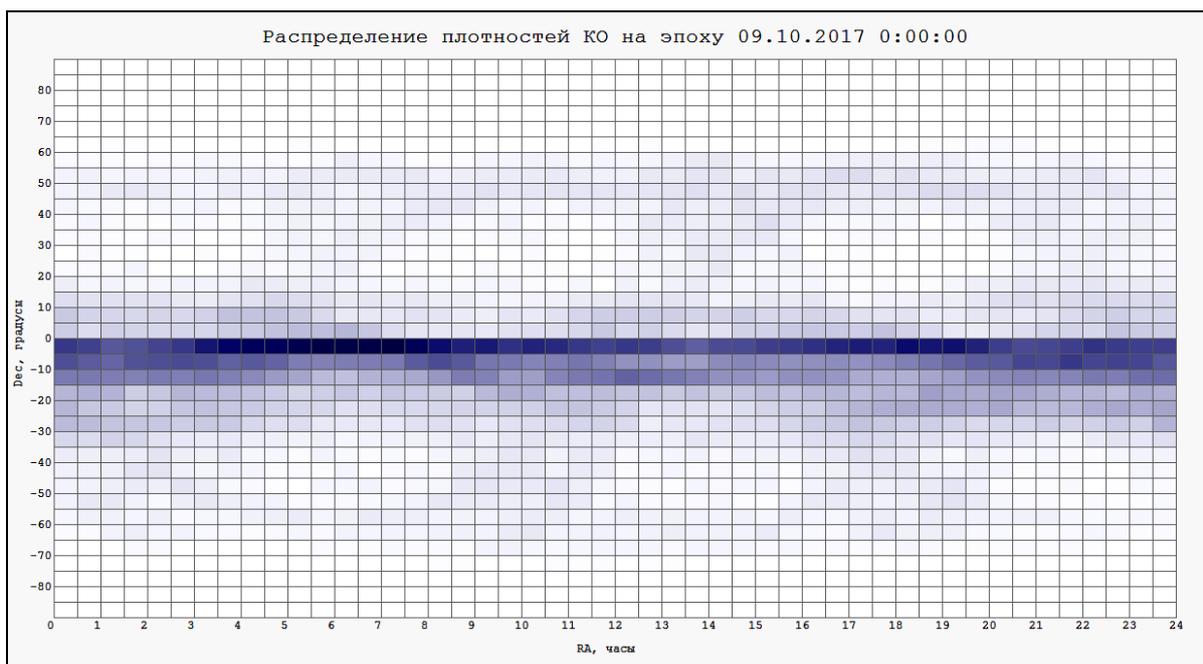


Рис. 2. Распределение плотностей группы ВЭО на заданную эпоху

Для оптимизации времени расчета положения КО в ПКАП применяется метод распараллеливания вычислений. Схема алгоритма представлена на рис. 3. Специальный модуль ПКАП будет следить за оптимальной загруженностью всех доступных вычислительных потоков. В настоящий момент вычисления выполняются на ЦПУ, но, возможно, в ходе развития программного комплекса будет рассмотрен перевод счетных задач на графические карты, что, конечно, приведет к повышению производительности.

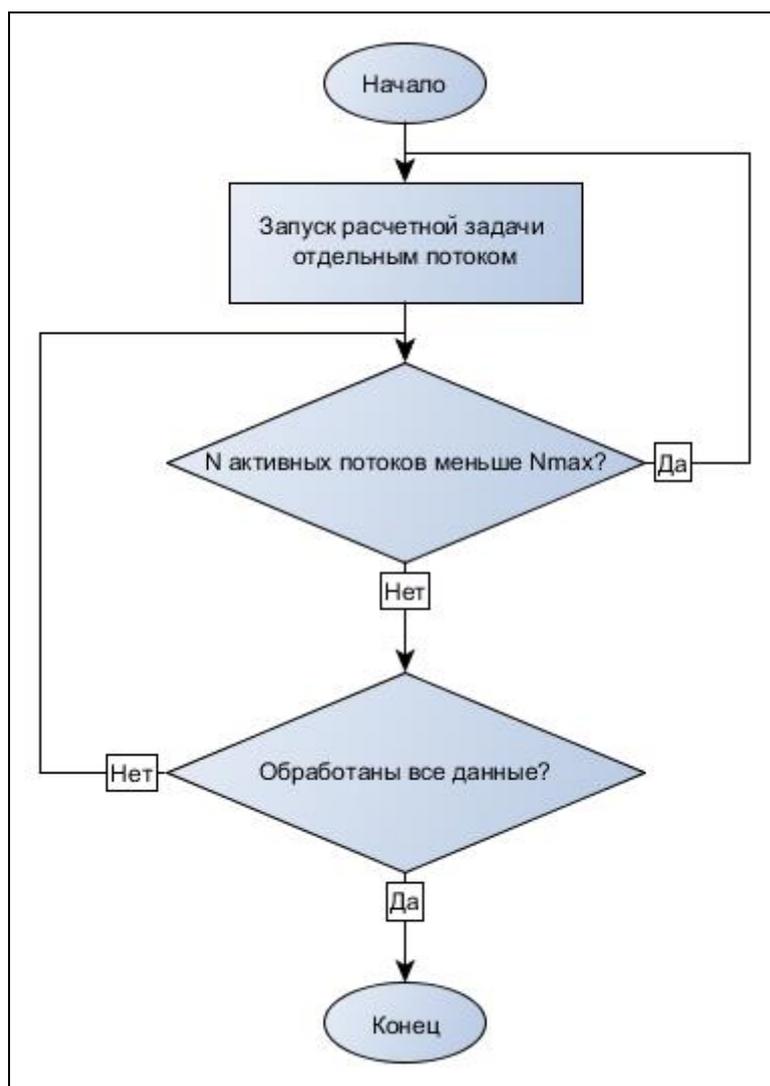


Рис. 3. Алгоритм системы распределения расчетных задач

4 Моделирование эффекта наблюдательной селекции

Говоря о теории наблюдательной селекции, применимой к решаемой задаче, стоит выделить несколько основных факторов, влияющих на успешное выполнение конечной цели — обнаружения и измерения КО. Очевидно, что наибольшая вероятность выполнения поставленной задачи не только связана с наблюдением тех областей неба, где плотность КО в течение наблюдательной ночи максимальна, но также с условиями самих наблюдений и сложностью

последующей обработки полученных данных. К данным критериям можно отнести следующие факты:

1. Проницающая способность телескопов при наблюдении с малыми углами места падает. Это явление вызвано атмосферной экстинкцией, обусловленной поглощением и рассеиванием света в атмосфере при увеличении её оптической толщи (атмосферной массы). Для расчета атмосферной массы воспользуемся формулой (1), где Z — зенитный угол КО.

$$M(Z) = (1 - 0,96 \sin^2 Z)^{-0,5}. \quad (1)$$

Расчет падения проницаемости в звездных величинах на одну атмосферную массу можно рассчитать по формуле рэлеевского рассеяния (5), с точностью, соразмерной поставленной задаче:

$$A_{Ray} = 0.1451 \cdot \exp\left(\frac{-h}{7,996}\right) \cdot M(Z), \quad (2)$$

$$\text{где } h = 90^\circ - z.$$

Исходя из графика (рис. 4) видно, что проницающая величина при зенитном угле $z = 80^\circ$ падает на ~ 1 звездную величину.

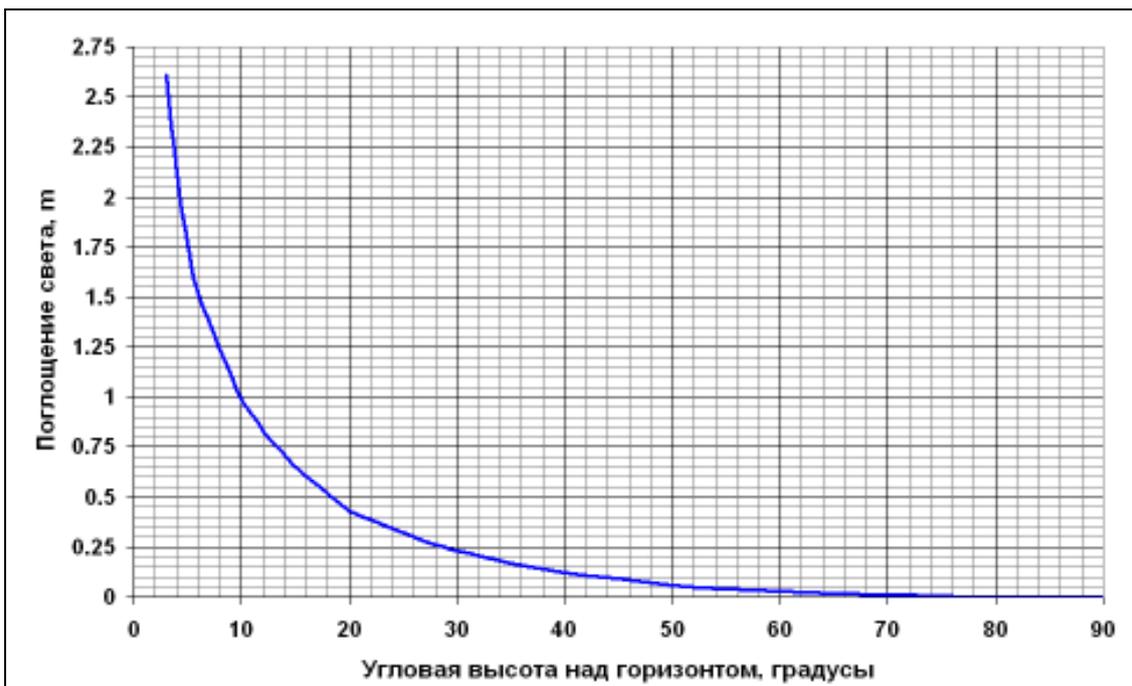


Рис. 4. График зависимости поглощения света от угла места

Стоит отметить, что при проведении позиционных измерений на ПЗС-кадрах, полученных при больших зенитных углах (более 80°), необходимо учитывать и эффект рефракции света.

2. Проницающая величина телескопов также зависит и от засветки неба Луной (градиентного повышения фона неба). Для её расчета будем использовать модель Krisciunas и Schaefer. Необходимые входные параметры: фаза Луны — α , угловое расстояние от точки наблюдения до Луны — ρ , коэффициент экстинкции — k , зенитный угол Луны — Z_m , зенитный угол точки наблюдения — Z , а также усреднённый уровень фона ночного неба в зените — B_z .

Рассчитаем атмосферную толщину для точки наблюдения по формуле (3). Далее определим яркость фона неба в точке наблюдения без учета Луны:

$$B_0 = B_z \cdot 10^{-0,4 \cdot k \cdot (M(Z) - 1)} \cdot X(Z), \quad (3)$$

где $X(Z)$ — атмосферная толщина в точке наблюдения.

Функция рассеяния имеет вид:

$$f(\rho) = 10^{5,36} \cdot [1,06 \cdot \cos^2(\rho)] + 10^{6,15 - \frac{\rho}{40^\circ}} + 6,2 \cdot 10^7 \cdot \rho^{-2}.$$

Освещенность Луны выражается как

$$I^* = 10^{-0,4 \cdot (3,84 + 0,026 \cdot \alpha + 4 \cdot 10^{-9} \cdot \alpha^4)}.$$

Определим яркость фона неба в точке наблюдения с учетом влияния Луны:

$$B_m = f(\rho) \cdot I^* \cdot 10^{-0,4 \cdot k \cdot M(Z_m)} \cdot (1 - 10^{-0,4 \cdot k \cdot M(Z)}).$$

И, наконец, по формуле (4) определим падение проницаемости ΔV_m , выраженное в звездных величинах:

$$\Delta V_m = -2,5 \cdot \lg \left[\frac{B_m + B_0(Z)}{B_0(Z)} \right]. \quad (4)$$

3. При наблюдении КО, обладающих высокой угловой скоростью, что характерно для средневысотных объектов (СВО) и ВЭО, на отдельных участках орбиты важно накапливать сигнал в режиме сопровождения, т.е. перемещать телескоп с угловой скоростью движения КО. В конечном счете, прохождение телескопа будет ограничено длительностью экспозиции, которая, в свою очередь, ограничена максимальной длиной треков звезд, которые еще могут быть измерены программными комплексами обработки ПЗС-кадров.

При несовпадении скорости ведения телескопа и угловой скорости КО отметки от объектов на ПЗС-кадрах будут растягиваться в трек, тем самым распределяя заряд по большей площади вместо концентрации энергии внутри центроида. С помощью формулы (5) можно рассчитать поверхностную яркость объекта, где m – интегральный блеск, A – длина трека в угловых секундах:

$$m_0 = m + 2,5 \cdot \log_{10} A. \quad (5)$$

Исходя из вышесказанного, можно показать, что, к примеру, при максимальной плотности ВЭО вдоль небесного экватора, так как все объекты пересекают его, эффективными областями для поиска КО на небесной сфере также являются апогейные зоны ВЭО, где угловая скорость КО минимальна. Пример карты распределения угловых скоростей для группы ВЭО можно видеть на рис. 5. Минимальное количество значений угловых скоростей для усреднения — не менее 10 на ячейку. Шум в зоне отрицательных склонений вызван малой плотностью КО. Данная карта является одним из слоев, накладываемых на базовую карту распределения плотностей КО с определенным весом. Например, при наблюдении ВЭО этот вес выше, а при наблюдении объектов ГСО данный слой можно вовсе исключить из расчётов.

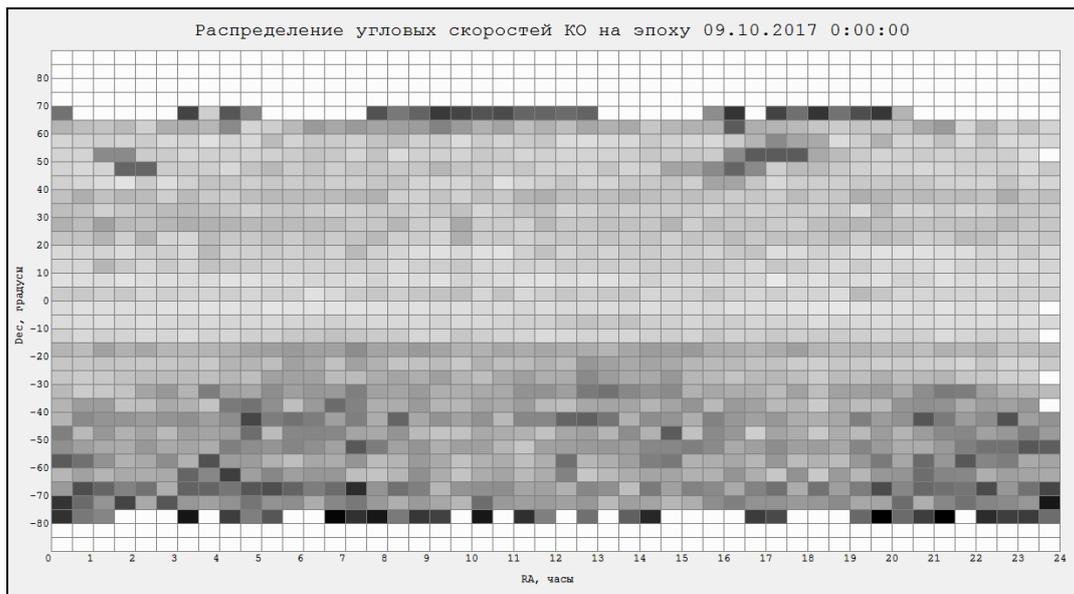


Рис. 5. Распределение угловых скоростей ВЭО на заданную эпоху

4. Одним из критериев, влияющих на вероятность детектирования КО на полученных ПЗС-кадрах, является удаленность точки наблюдений от галактического экватора. Чем меньше галактическая широта, тем выше плотность звезд фона и, тем самым, выше вероятность наложения на них целевого объекта или невозможность разделить два слившихся объекта методом деблендинга. Эта проблема особенно остро стоит при применении оптико-электронных средств с большим масштабом изображения, измеряемым в секундах дуги на пиксель. Описываемый критерий особенно важен при обработке кадров, полученных в режиме наблюдения, отличном от часового ведения телескопа. В данном случае, звезды фона растягиваются в треки, и их высокая плотность снизит выход измеряемых объектов — часть из них будет пропущена. Те же проблемы относятся и к визуальной инспекции ПЗС-кадров, с целью ручной разметки обнаруженных объектов. Отдельно стоит отметить и экспоненциальное возрастание времени обработки кадров, полученных в плотных звездных полях, что, безусловно, скажется на оперативности получения данных. Пример кадра, полученного вблизи галактического экватора, вы можете видеть на рис. 6, где треки от звезд фона занимают существенную площадь изображения.

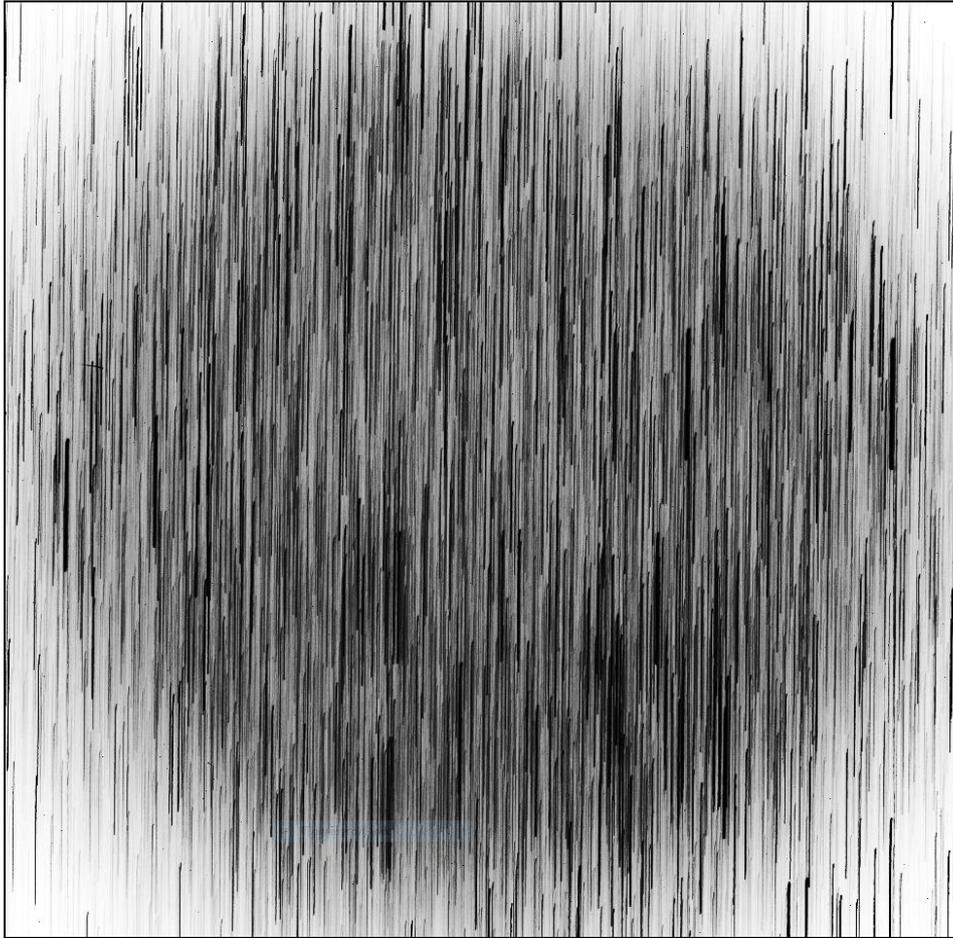


Рис. 6. Пример ПЗС-кадра, снятого вблизи галактического экватора

Помимо модуля средней угловой скорости, для каждой ячейки хранятся и усредненные значения угловых скоростей по обеим осям, что позволит проводить наблюдения поисковых площадок с усредненной угловой скоростью интересующих нас групп КО, пролетающих через указанную область небесной сферы. Такой режим наблюдения повысит проникание, а следовательно, и увеличит эффективность поиска и обнаружения целевых КО.

Угловое расстояние до галактического экватора можно определить, как галактическую широту точки наблюдения. Ниже представлена формула (6) вычисления галактической широты b по координатам, представленным во второй экваториальной системе координат (α, δ) , где α' и δ' — экваториальные координаты северного галактического полюса для эпохи J2000.0:

$$\sin b = \sin \delta \cdot \sin \delta' + \cos \delta \cdot \cos \delta' \cdot \cos(\alpha - \alpha'). \quad (6)$$

5 Переход к карте эффективности обнаружения КО

Как было показано выше, области с максимальной плотностью распределения КО не всегда являются наиболее эффективными для наблюдений. Поэтому предлагается использовать не карту распределения плотностей КО, а ее производную — карту эффективности обнаружения КО.

За базис берутся нормализованные значения плотности объектов ρ_c для каждой из ячеек карты, принимающие значения от 0 до 100. Далее к ним применяются нормализованные критерии, описанные выше. Каждый критерий обладает своим весовым коэффициентом, тем самым мы можем настраивать алгоритм под определенный тип объектов. К примеру, для наблюдения ГСО критерий угловых скоростей не является важным, в отличие от наблюдения ВЭО. Итак, результирующее значение коэффициента эффективности для конкретной ячейки будет равно:

$$Q_c = w_A A_c \cdot w_K K_c \cdot w_v v_c \cdot w_b b_c \cdot \rho_c,$$

где w — вес каждого из коэффициентов, а A, K, v, b — коэффициенты экстинкции, влияния Луны, угловой скорости и галактической широты соответственно.

Подбор весовых коэффициентов может быть индивидуален для каждого НП и целей обзора, предоставляя большую гибкость при работе с ПКАП. На рис. 7 показан пример результирующей карты эффективности обнаружения КО, основанной на карте распределения плотностей, с наложенным слоем угловых скоростей (при $w_v = 0,5$). Хорошо видна апогейная зона ВЭО.

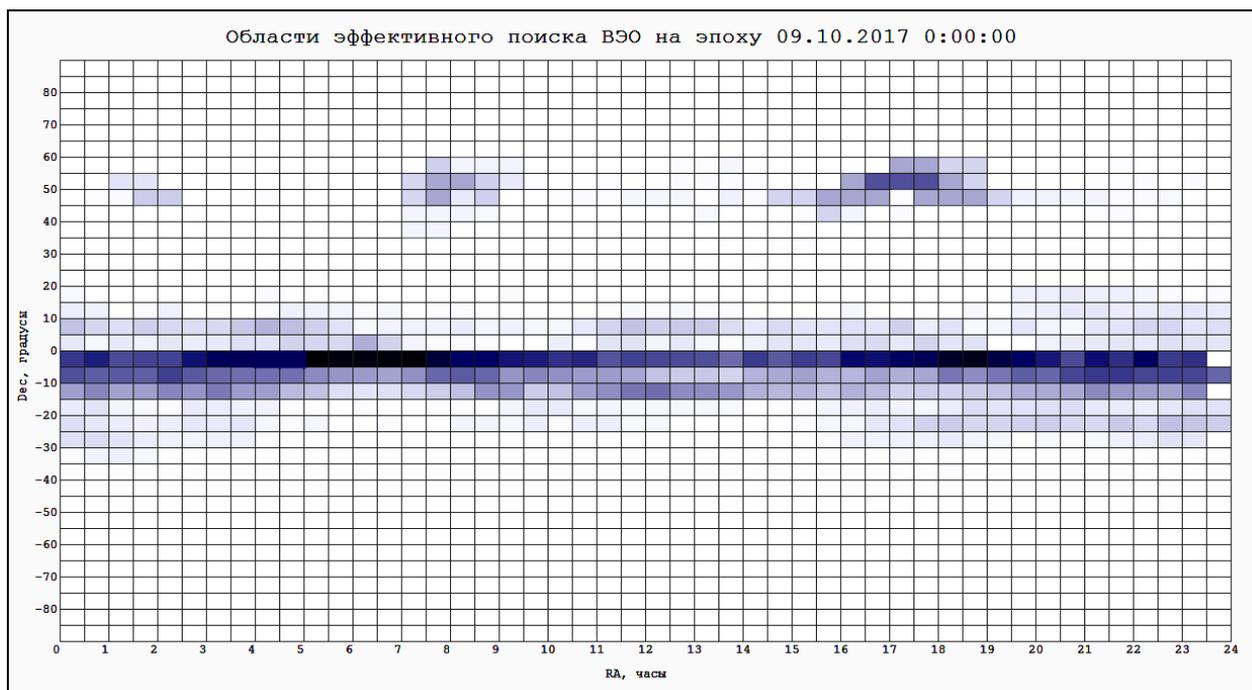


Рис. 7. Карта эффективности обнаружения ВЭО

6 Комбинированный режим наблюдений

В отличие от описанного выше подхода определения зон для эффективного поиска КО, при работе в комбинированном режиме, т.е. совмещенном наблюдении КО по целеуказанию (ЦУ) и поисковых наблюдений, нам необходимо выбрать из списка орбит объекты, нуждающиеся в уточнении в течение ближайшей наблюдательной ночи. К таким объектам могут быть отнесены:

1. только что открытые объекты или вновь обнаруженные, утерянные ранее КО;
2. объекты, потенциально участвующие в опасных сближениях на горизонте ближайших нескольких суток;
3. давно не наблюдавшиеся КО, для которых велик риск быть утерянными;
4. прочие объекты повышенного интереса, отсутствующие в открытых орбитальных каталогах.

После отбора объектов их необходимо отсортировать по порядку наблюдения в течение ночи. Для этого введем ранг для каждого из объектов, который может быть рассчитан по формуле:

$$R = \frac{P \cdot h}{\psi \cdot d},$$

где P — нормализованный приоритет цели. Объекты с высоким приоритетом будут наблюдаться в первую очередь, если для этого не будет наблюдательных ограничений, которые будут описаны ниже.

h — нормализованный коэффициент угла места. При нахождении целевого КО в восточной области небесной сферы выгоднее наблюдать объекты, расположенные на максимально возможных углах места из-за рассмотренной выше атмосферной экстинкции. КО, находящиеся к западу от небесного меридиана, следует наблюдать на минимально возможных углах места, т.к. эти объекты заходят за горизонт.

ψ — нормализованный коэффициент текущего фазового угла КО. Влияние фазового угла на эффективность наблюдения и обнаружения КО была нами рассмотрена выше.

d — коэффициент дистанции перемещения телескопа. Чем меньше дистанция перемещения телескопа от текущей цели к следующей, тем ниже временных потери. Для телескопов, размещенных на экваториальных опорно-поворотных устройствах (ОПУ), будет введен штрафующий множитель за переключку ОПУ через небесный меридиан. Данный коэффициент может быть применен и при гибридном плане наблюдения, когда наблюдения по ЦУ проводятся совместно с поисковыми задачами. В этом случае повышенный приоритет будет отдаваться тем объектам, которые расположены максимально близко к областям эффективного поиска КО.

7 Автоматическая генерация плана наблюдений

Последним этапом работы ПКАП является создание и вывод в файл формализованного плана наблюдений, который может быть загружен на телескоп и выполнен в автоматическом режиме. Для создания программы наблюдений оператор выбирает тип данных, с которым он будет работать. Это может быть как основная матрица плотностей распределения КО на небесной сфере, так и матрица эффективности наблюдений, рассмотренная ранее. Во втором случае оператор может выбирать типы и веса критериев, участвующих в расчетах.

Для работы ПКАП использует характеристики НП, заданные в конфигурационном файле.

На основании всех заданных параметров рассчитываются среднее время выполнения наблюдательного задания для каждой наблюдательной площадки T_s . продолжительность астрономических сумерек T_n (или длительность наблюдательной ночи, заданной параметрами минимального погружения Солнца). По формуле (7) можно рассчитать максимальное число наблюдательных площадок (равных по площади полю зрения телескопа S_{FOV}) для одной наблюдательной ночи.

$$N_{max} = \left\lfloor \frac{T_n}{T_s} \right\rfloor. \quad (7)$$

В случае, если площадь ячейки карты $S_c \leq S_{FOV}$, то координаты данной ячейки являются координатами центра наблюдательной площадки. В противном случае ячейка карты покрывается наблюдательными площадками, расходящимися спиралью, начиная из центра ячейки (рис. 8).

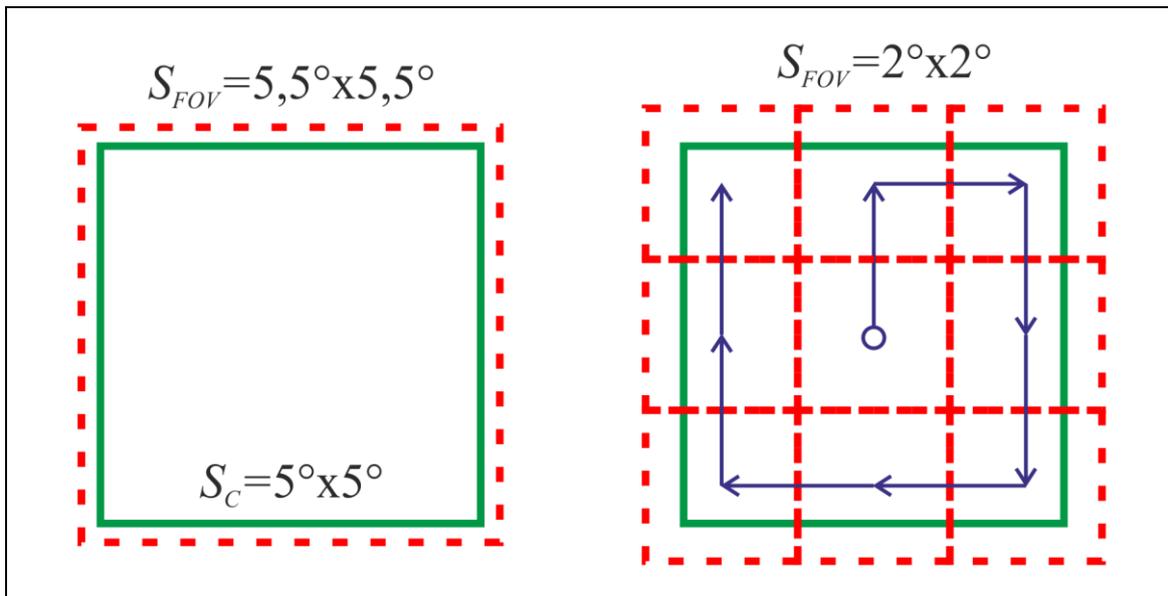


Рис. 8. Обход площадок при различных полях зрения

Порядок обхода площадок может быть задан в настройках ПКАП. При перемещении к наблюдательной площадке выполняется проверка на её принадлежность к данной ячейке. Если все наблюдательные площадки текущего рукава спирали не принадлежат ячейке карты – считаем, что данная ячейка полностью покрыта и выполняется переход к следующей (рис. 9).

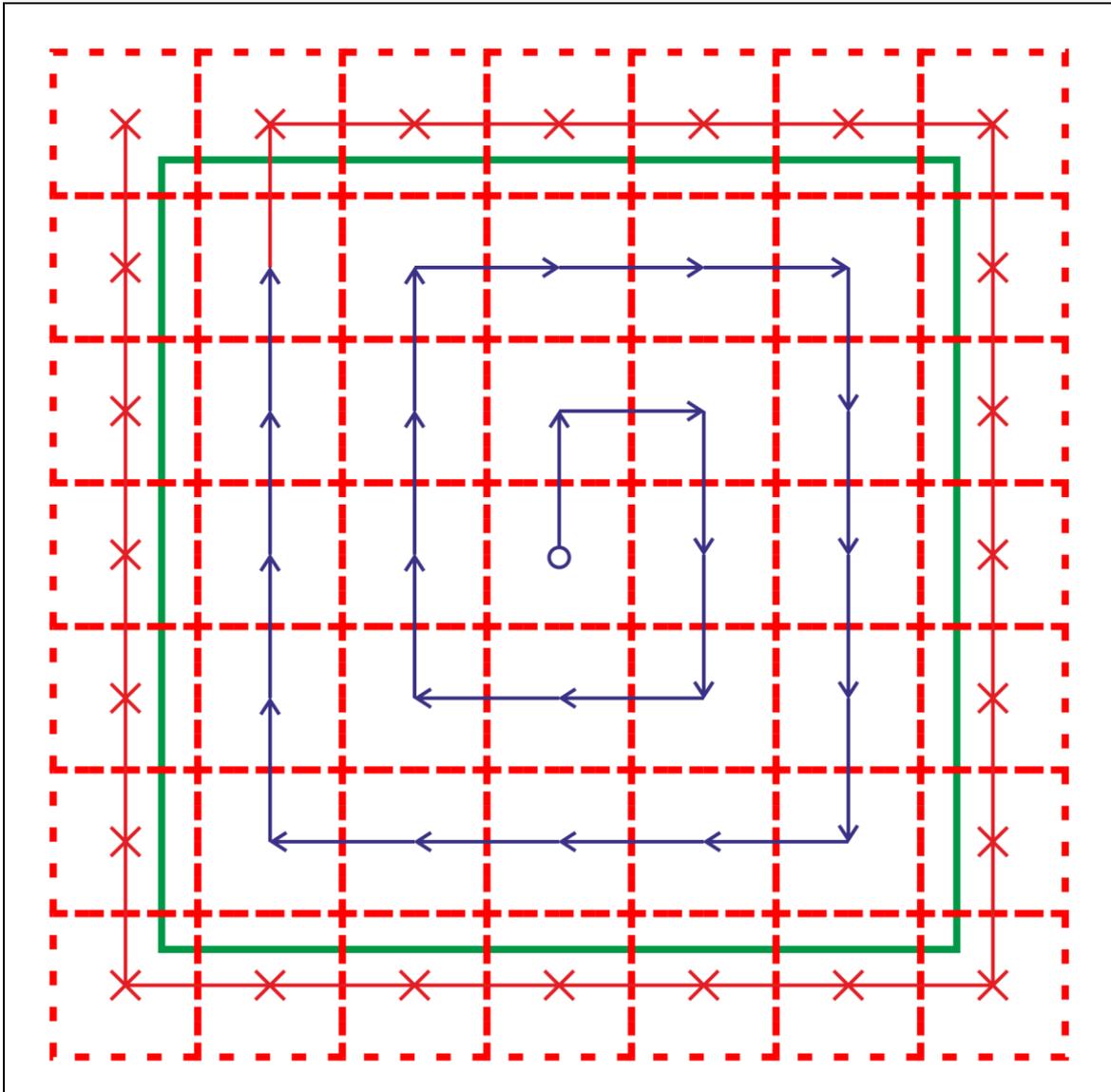


Рис. 9. Обход текущей ячейки и определение её границ

Для различных полей зрения оптического средства, используемого на НП, необходимо рационально подобрать размер ячеек сетки, но стоит избегать чрезмерно малых ячеек ввиду увеличения статистической погрешности. ПКАП ограничивает минимальный размер ячейки сетки до $5^\circ \times 5^\circ$, что хорошо согласуется с большинством полей зрения оптических средств существующих НП.

Помимо этого, нам необходимо учитывать и ограничения:

1. минимальный угол места проводимых наблюдений, заданный в параметрах НП;
2. максимальную угловую скорость КО;
3. ограничение фазового угла наблюдаемого объекта;
4. нахождение КО в тени Земли.

Остановимся на пунктах 2 и 3 более подробно. Фазовый угол сильно влияет на блеск КО. Исходя из формулы (8), определяющей блеск объекта

(расчет для сферы с диффузным отражением), мы видим, что при фазовом угле $\psi = 0^\circ$ блеск КО будет максимальным и будет снижаться при увеличении этого угла. При $\psi = 90^\circ$ для наблюдателя будет освещена только половина КО.

$$m = -26,5 - 2,5 \cdot \lg \left(\frac{S \cdot A \cdot \cos^2 \left(\frac{\psi}{2} \right)}{r^2} \right). \quad (8)$$

Исходя из этого, следует вывод о том, что обнаружение КО эффективнее проводить в областях с минимальными фазовыми углами и следует избегать проведения наблюдений на больших фазовых углах. Предельное значение фазового угла задается оператором в виде ограничивающих условий.

Для определения нахождения КО в тени Земли выполняем расчет текущих геоцентрических координат Солнца и искомого объекта, угол φ и угловые размеры Земли r_E и Солнца r_S относительно КО. Если $r_E > \varphi$, то КО находится в тени (положение III). Если $r_E + r_S > \varphi$, то объект находится в полутени (положение II). В противном случае КО находится вне тени Земли (положение I) на рис. 10.

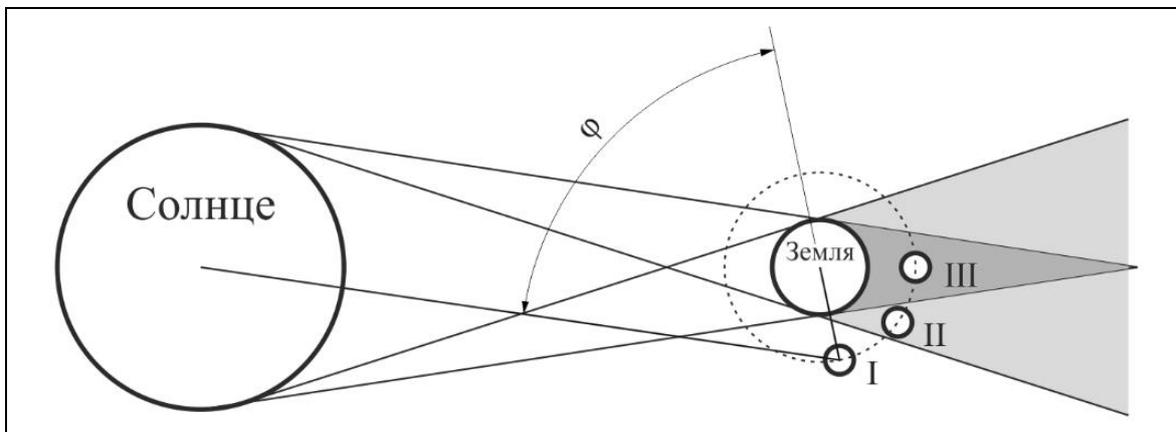


Рис. 10. Расчет попадания КО в тень Земли

Автоматический выбор оптимального времени экспозиции для конкретной цели должен быть настроен индивидуально, в пределах минимальной и максимально возможной экспозиции (t_{min}, t_{max}) для конкретного телескопа, на основании проведения калибровочных измерений с различными экспозициями и расчета проникающей способности для каждой из них. К примеру, для НП 99927 (Нью-Мексико) данная эмпирическая функция выражена как:

$$t_{exp} = 6,4 \cdot e^{0,3m_{lim}}, E(f) = [t_{min}; t_{max}].$$

Добавление отдельных заданий на наблюдения в общий наблюдательный план будет выполняться в порядке понижения их коэффициента эффективности Q_c с минимизацией времени перенаведения телескопа и избегания его перекладки через небесный меридиан. При определении очередности выполнения планов будет учитываться и время восхода, транзита и захода каждой из наблюдательных зон. При достижении N_{max} план наблюдений для выбранного НП будет полностью сформирован.

Запись наблюдательного плана в файл может производиться в стандартном формате objectlist, используемом в настоящий момент сетью телескопов НСОИ АФН, либо в перспективных форматах обмена заданиями на наблюдения (xml или json).

Библиографический список

1. Субботин М. Ф. Введение в теоретическую астрономию. Москва: Наука. 1968.
2. Meeus J. Astronomical algorithms 2-nd ed. Willmann-Bell, Inc. 1998. — ISBN: 0-943396-61-1.
3. Vallado D. A. Fundamentals of Astrodynamics and Applications 4th ed. Microcosm Press. 2013. — ISBN: 978-11881883180.
4. Krisciunas K., Schaefer B. E. A model of the brightness of moonlight // Astronomical Society of the Pacific. — 1991. — vol. 103, p. 1033-1039.
5. Полак Э. Численные методы оптимизации М.: Мир. 1974. — 374 с.
6. Киладзе Р. И., Сочилина А. С. Теория движения геостационарных спутников. СПб: ООО «ВВМ». 2008. — 132 с.