



Ахметшин Р.З.

Оптический барьер
космического базирования в
проблеме астероидной
опасности

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Ахметшин Р.З. Оптический барьер космического базирования в проблеме астероидной опасности // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2012. № 29. 32 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2012-29>

Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Российской Академии Наук

Р.З.Ахметшин

ОПТИЧЕСКИЙ БАРЬЕР
КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ
В ПРОБЛЕМЕ АСТЕРОИДНОЙ ОПАСНОСТИ

Москва – 2012

Аннотация.

Исследованы различные варианты организации космического патруля для обнаружения и каталогизации опасных для Земли космических объектов. В их основе лежит идея создания «оптического барьера» с помощью телескопов, размещенных на гелиоцентрической орбите. Проанализированы трудности и пути их преодоления, связанные с формой и положением орбиты космического объекта относительно космических аппаратов патруля, определением параметров орбиты, взаимным движением космических объектов и телескопов на космических аппаратах. Рассмотрены схемы барьера со сканированием вертикальной и горизонтальной полос. Приведены примеры условий наблюдения космических объектов при пересечении ими области барьера: угловые положения, скорости, дальности, количество суток, в течение которых они наблюдаются в области барьера. Даны характеристики барьера при размещении телескопов на орбитах Земли, Венеры и Меркурия. Ключевые слова: астероидная опасность, космический патруль, оптический барьер.

Akhmetshin R.Z.

Space based Optical Barrier in the Problem of Asteroid Hazard.

Different variants of Space Patrol System designed for discovering and cataloguing of hazard asteroids are investigated. The base idea of Space Patrol is creation of an «optical barrier» with the help of telescopes deployed on the heliocentric orbit. Difficulties associated with the relative motion of spacecraft's telescopes and hazard objects and with necessity of estimation of their orbits are analyzed. Examples of observation conditions (angles, distances, velocities etc) at the moments when the hazard object crosses the barrier area are given. Characteristics of barrier are compared in cases of deployment the telescopes on heliocentric orbits of Earth, Venus and Mercury.

Key words: asteroid's hazard, space patrol, optical barrier.

В 2000 г. Т.М.Энеевым была выдвинута идея создания «оптического барьера» – системы контроля телескопами, размещенными на орбите Земли (вокруг Солнца), определенных областей космического пространства – с целью обнаружения и каталогизации большинства малых тел (диаметром, например, более 200 м), которые могут представлять опасность для Земли [1,2]. Имелись в виду, главным образом, астероиды, сближающиеся с Землей (АСЗ). На основе имевшихся к тому времени данных им были сделаны

предварительные оценки, какой проникающей силы для этого необходим телескоп, и была предложена следующая схема такого барьера [3,8-10].

1. Схема оптического барьера со сканированием вертикальной полосы.

Предлагалось на гелиоцентрической орбите Земли расположить на равном расстоянии друг от друга шесть космических аппаратов (КА), на каждом из которых должно быть по 2 телескопа (рис.1). Один телескоп должен сканировать узкую вертикальную полосу в направлении КА, расположенного впереди по ходу движения данного КА по орбите. Вторым телескопом – аналогичную полосу в направлении КА, расположенного сзади данного КА. Таким образом, пространство между двумя аппаратами должно обозреваться с двух КА двумя телескопами. Два телескопа необходимы потому, что иначе объекты, пролетающие слишком близко от данного телескопа, будут иметь большую угловую скорость, и могут проскочить барьер «незамеченными» этим телескопом, пока он будет сканировать другие части вертикальной полосы. С других КА этот объект может оказаться незамеченным из-за слишком большого расстояния от телескопа, даже если он попадет в их поле зрения.

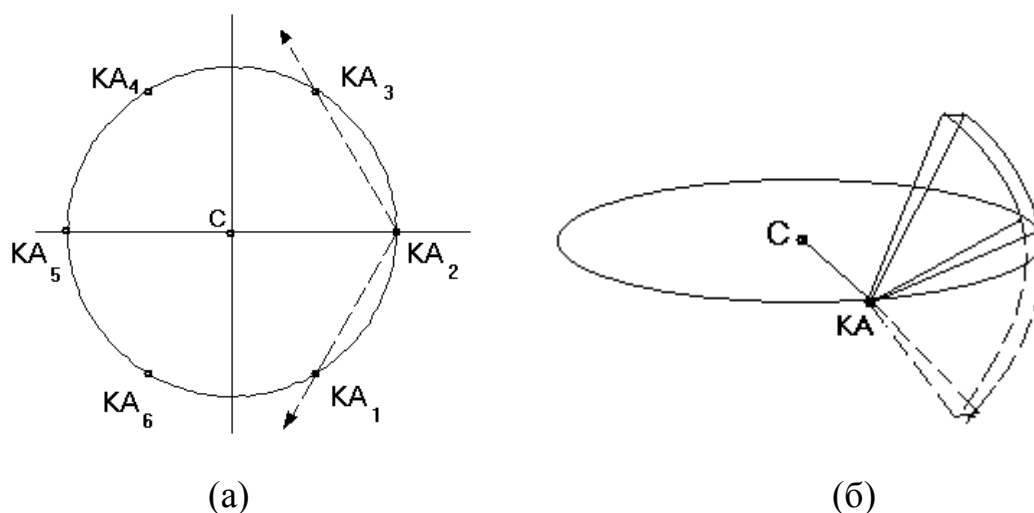


Рис.1. Схема «оптического барьера»:

- (а) расположение на орбите Земли вокруг Солнца (С) космических аппаратов (КА₁..КА₆) патруля с двумя телескопами на каждом КА;
- (б) часть телесного угла, обозреваемого одним из телескопов.

2. Угловые скорости пересечения оптического барьера.

Оценим угловые скорости астероидов при пересечении ими области барьера. Рассмотрим сначала более простой для анализа плоский случай (рис.2а) – когда орбита астероида имеет нулевое наклонение, и, следовательно, орбиты астероида и КА лежат в одной плоскости. Направим ось ординат вдоль центральной оси луча телескопа в тот момент, когда ее пересекает астероид (в точке А на рис.2а). Из $\triangle CAT_1$ (T_1 – местоположение телескопа) и $\triangle CAO$ (O – точка пересечения осей «х» и «у») получим:

$$CO = R_3 \cdot \cos(30^\circ) = \sqrt{3}/2 \text{ а.е.},$$

где $R_3 = 1$ а.е. – радиус орбиты Земли; расстояние r от Солнца до астероида

$$r = CA = \sqrt{(CO)^2 + d^2}, \text{ где } d = OA \in [-0.5, 0.5].$$

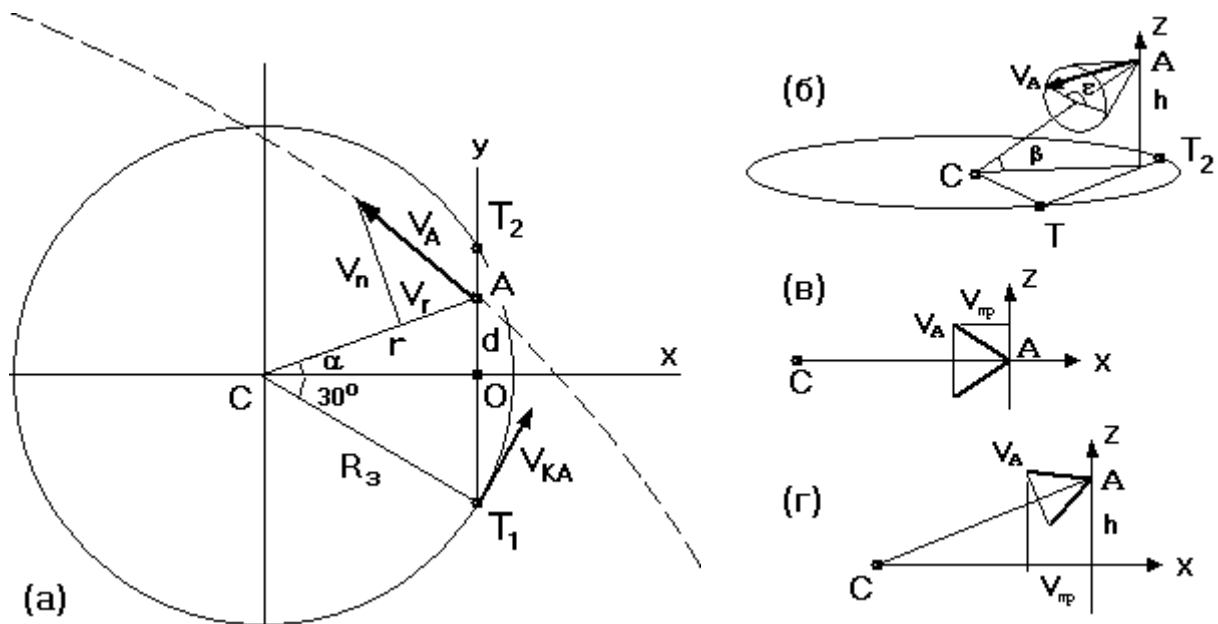


Рис.2. Пересечение оптического барьера астероидом.

Радиальную и трансверсальную составляющие вектора скорости астероида вычислим из следующих соотношений:

$$V_r = c \cdot e \cdot \sin\theta / p, \quad V_n = c / r, \quad c = \sqrt{\mu \cdot p}, \quad e = (Q - q) / (Q + q), \quad p = 2 \cdot q \cdot Q / (Q + q),$$

а $\sin\theta$ получим из $r = p / (1 + e \cdot \cos\theta)$:

$$V_r^2 = c^2 \cdot e^2 \cdot \sin^2\theta / p^2 = \mu \cdot e^2 \cdot (1 - \cos^2\theta) / p = [e^2 - (p/r - 1)^2] \cdot \mu / p =$$

$$= (e + p / r - 1) \cdot (e - p / r + 1) \cdot \mu / p .$$

Здесь e , p – соответственно эксцентриситет орбиты и ее фокальный параметр, q , Q – расстояние от Солнца до перигелия и афелия, θ – истинная аномалия. Проецируя на ось «х» векторы скорости астероида $V_A = \langle V_r, V_n \rangle$ и КА $V_{КА}$, вычислим относительную скорость движения астероида по отношению к лучу телескопа. В результате получим следующие значения угловой скорости астероида:

$$\varpi_1 = (\pm V_r \cdot \cos\alpha + V_n \cdot \sin\alpha + V_{КА} \cdot \sin 30^0) / \Delta_1 - \varpi_0 ,$$

где $\sin\alpha = d / r$, $\cos\alpha = \sqrt{3} / (2r)$; $\Delta_1 = R_3 / 2 + d$ – расстояние от астероида до телескопа; ϖ_0 – угловая скорость поворота луча телескопа в плоскости эклиптики. Предполагается, что вместе с поворотом по орбите всей системы КА непрерывным образом изменяется и направление сканируемой полосы (со скоростью 360 градусов за год, или за 365.25 суток, соответственно $\varpi_0 \approx 1$ градус/сутки), так что сохраняется геометрия оптического барьера. Если телескоп на время экспозиции фиксируется на определенном участке небесной сферы, а от кадра к кадру поворот происходит не только в вертикальном направлении, но и в горизонтальном – в плоскости эклиптики, то ϖ_0 будет представлять собой среднюю скорость поворота луча телескопа. Знак «+» соответствует входу астероида внутрь орбиты Земли, знак «-» – выходу.

По отношению к лучу телескопа, направленного с КА₂ назад – на КА₁, угловая скорость будет

$$\varpi_2 = (\pm V_r \cdot \cos\alpha - V_n \cdot \sin\alpha + V_{КА} \cdot \sin 30^0) / \Delta_2 - \varpi_0 , \Delta_2 = R_{орб} / 2 - d.$$

При этом знак «-» соответствует входу астероида внутрь орбиты Земли, знак «+» – выходу.

В табл. 1 приведены угловые скорости астероида «Apollo», пересекающего барьер на различных расстояниях от телескопа (точнее, астероида, орбита которого имеет такие же параметры $q = 0.65$ и $Q = 2.29$ а.е., как и астероид Apollo, но отличается от него наклоном $i : 0^0$ вместо 6.36^0).

Табл.1. Угловые скорости ω пересечения оптического барьера астероидом «Аполло» при наблюдении с одного телескопа; r , Δ – расстояния от астероида до Солнца и до телескопа; индексы «1», «2» – обозначают номер телескопа, «ВХ», «ВЫХ» – направление движение по орбите.

d	r	Δ_1	$\omega^1_{ВХ}$	$\omega^1_{ВЫХ}$	Δ_2	$\omega^2_{ВХ}$	$\omega^2_{ВЫХ}$
0.5	1	1	0.48	-0.47	0	∞	∞
0.4	0.954	0.9	0.59	-0.50	0.1	-5.35	4.51
0.3	0.917	0.8	0.71	-0.56	0.2	-2.83	2.24
0.2	0.889	0.7	0.81	-0.66	0.3	-1.90	1.54
0.1	0.872	0.6	0.92	-0.81	0.4	-1.38	1.22
0	0.866	0.5	1.04	-1.04	0.5	-1.04	1.04
-0.1	0.872	0.4	1.22	-1.38	0.6	-0.81	0.92
-0.2	0.889	0.3	1.54	-1.90	0.7	-0.66	0.81
-0.3	0.917	0.2	2.24	-2.83	0.8	-0.56	0.71
-0.4	0.954	0.1	4.51	-5.35	0.9	-0.50	0.59
-0.45	0.976	0.05	9.17	-10.18	0.95	-0.48	0.54
-0.5	1	0	∞	∞	1	-0.47	0.48

Видно, что если расстояние до телескопа меньше 0.05 а.е., то угловая скорость превышает 10 градусов/сутки. Чтобы гарантированно не пропустить незамеченным астероид с большой угловой скоростью, полоса сканирования, в случае одного телескопа, должна быть достаточно широкой.

В случае двух телескопов она может быть значительно уже. Если считать, что основной рабочей областью каждого телескопа будет диапазон расстояний до объекта $[0.5 \div 1]$ а.е., то угловая скорость для астероида «Аполло», как видно из табл.2, не будет превышать 1.04 град/сутки. Максимальная (по абсолютной величине) угловая скорость в основном рабочем диапазоне телескопа получается в случае пролета на расстоянии в 0.5 а.е., причем она одинакова как на этапе сближения астероида с Солнцем ($\omega_{ВХ}$), так и на этапе удаления ($\omega_{ВЫХ}$).

Табл.2. Меньшие по абсолютной величине угловые скорости пересечения оптического барьера астероидом «Apollo» при наблюдении с двух телескопов.

d	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
ϖ^1_{BX}	0.48	0.59	0.71	0.81	0.92	1.04					
ϖ^2_{BX}						-1.04	-0.81	-0.66	-0.56	-0.50	-0.47
$\varpi^1_{ВЫХ}$	-0.47	-0.50	-0.56	-0.66	-0.81	-1.04					
$\varpi^2_{ВЫХ}$						1.04	0.92	0.81	0.71	0.59	0.48

Табл.3. Максимальные значения угловой скорости пересечения оптического барьера (выбирается меньшая из двух величин $|\varpi^1|$, $|\varpi^2|$) в пределах основного рабочего диапазона дальностей телескопа в плоском случае.

q\Q	1	3	8	50
1	0	0.11	0.16	
0.5	0.58	1.52	1.78	
0.1	0.98	2.34	2.64	
0.01				2.96

В табл.3 представлены максимальные значения угловых скоростей пролета для широкого диапазона параметров q, Q орбит, рассчитанные при $i = 0^0$. Отметим, что в каталоге АСЗ 2001 г. [4] минимальное значение параметра q составляет 0.12 а.е. (астероид 2000 LK), максимальное значение параметра Q составляет 7.96 а.е. (астероид 5025 P-L (L)).

Рассмотрим пространственный случай. Он возникает, во-первых (рис.2б), если появляется вертикальная составляющая h в точке пересечения плоскости барьера, и во вторых, при вращении плоскости орбиты вокруг прямой СА. При этом вектор скорости заметает коническую поверхность. В случае $d = 0$, $h = 0$, когда прямая СА перпендикулярна плоскости барьера (рис.2в), проекции всех скоростей конуса на ось «х» одинаковы, и равны

высоте конуса, т.е. радиальной составляющей V_r . Если $h > 0$ (рис.2г), проекция скорости может превышать V_r . Хотя при этом увеличивается расстояние $r = \sqrt{(CO)^2 + h^2}$, и при заданных q , Q скорость V уменьшается, тем не менее угловая скорость может быть больше, чем в плоском случае.

Например, для орбит с $q = 0.65$, $Q = 2.29$ (как у Apollo), угловая скорость может увеличиться с 1.04 град/сутки (при $h = 0$, $\varepsilon = 0^0$) до 1.67 (при $h = 0.43$ а.е., $\varepsilon = 90^0$), т.е. в 1.6 раза; для орбит с $q = 0.1$, $Q = 8$ – с 2.644 до 2.7, т.е. в 1.02 раза; а для орбит с $q = 0.01$, $Q = 50$ эффект конуса практически отсутствует. Объясняется это тем, что на таких орбитах космический объект (КО) вблизи перигелия движется почти по прямой к Солнцу или от него, вектор скорости параллелен радиус-вектору, и «конус» вырождается в прямую; при $d = 0$, $h = 0$ вектор скорости перпендикулярен плоскости барьера, поэтому угловая скорость пересечения барьера для такой орбиты близка к максимально возможной.

Следовательно, в рамках рассматриваемой схемы оптического барьера, максимальные значения горизонтальной составляющей угловой скорости всех объектов Солнечной системы, пересекающих барьер (в пределах основного рабочего диапазона дальностей), т.е. имеющих эллиптическую орбиту, а не приходящих извне, не превышают 3 градусов в сутки. Причем это имеет место не только для объектов с прямым движением, но и с обратным. Оценим, какой для этого должна быть ширина области барьера, и каким должен быть растров луча телескопа.

Если возможности телескопа позволяют просканировать вертикальную полосу раз в сутки, то самые быстрые объекты, пересекающие барьер на расстоянии 0.5 а.е., за сутки могут пройти горизонтальную дугу $\leq 3^0$. В таком случае, минимальная угловая ширина области барьера и луча телескопа должна быть 3^0 . Если вертикальная полоса может быть просканирована за сутки дважды (и, следовательно, могут быть просканированы две соседние полосы), то ширина луча телескопа может быть уменьшена в два раза – до $1^0.5$, и т.д.

3. Трудности, связанные с взаимным движением КО и КА.

Однако, как показало моделирование работы оптического барьера, полоса шириной в 3° не обеспечивает стопроцентного обнаружения доступных для наблюдения по звездной величине объектов. Связано это с динамикой взаимного движения космических объектов и КА. Например, космический объект, движущийся по орбите Земли посередине между двумя КА, никогда не попадет в поле зрения телескопов. Объекты, орбиты которых имеют $q \approx 1$, $Q > 1$, также могут не попасть в поле зрения телескопов на приемлемых расстояниях, по крайней мере, на одном витке, при определенном «начальном» взаимном положении астероида и системы КА патруля.

В табл.4 приведен пример наблюдения такого астероида на одном из витков орбиты. Вначале, за 90 суток до пролета перигелия, астероид попадает в поле зрения телескопа на КА, которому присвоим номер 1, и направленного назад – против направления движения. При ширине сканируемой полосы в 3° он наблюдается в течение 6 суток.

Табл.4. Условия наблюдения астероида с $q = 1$ а.е., $Q = 5$ а.е., $i = 0^\circ$: № КА – порядковый номер КА; t – момент наблюдения (в сутках от момента прохождения перигелия); r , Δ – расстояния от астероида до Солнца и до телескопа; u_A – угловое положение астероида; u_T – направление (центральной оси) луча телескопа.

№ КА Направление	t [сутки]	u_T [град]	u_A [град]	r [а.е.]	Δ [а.е.]
1 (назад)	-90..-85	241.3..246.3	242.4..244.9	1.54..1.50	1.75
4 (вперед)	85..90	113.8..118.7	115.1..117.7	1.50..1.54	1.75

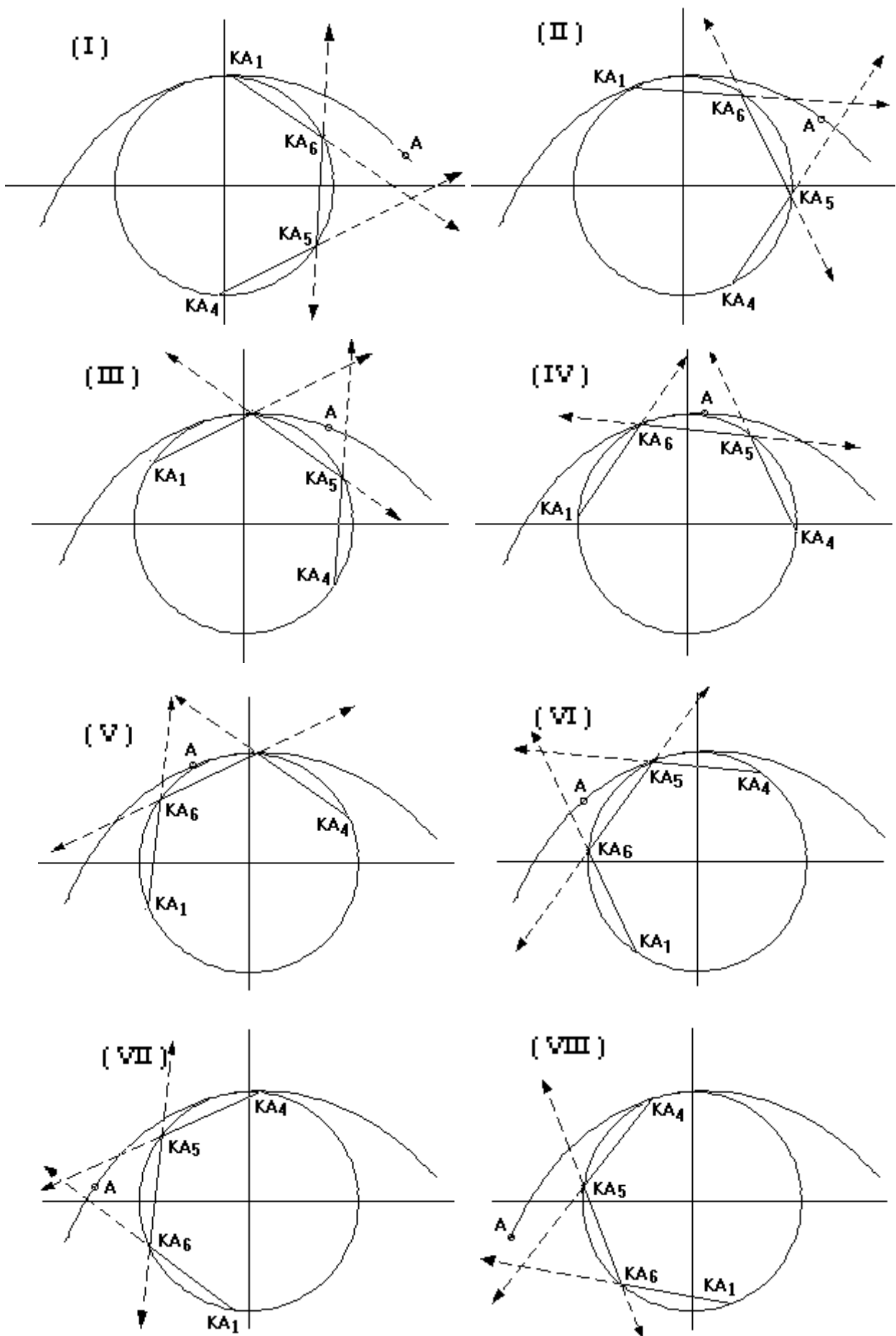


Рис.3. Взаимное движение астероида и КА патруля.

При этом расстояние от астероида до Солнца ≥ 1.5 а.е., от астероида до телескопа – 1.75 а.е. Второй раз астероид попадает в поле зрения телескопа на КА № 4, направленного вперед по ходу движения КА, через полгода, или через 85–90 суток после пролета перигелия. Условия наблюдения в данном случае почти полностью симметричны.

На рис.3 показано, как происходит движение астероида в окрестности перигелия. На приведенном участке орбиты продолжительностью в 7 месяцев астероид большую часть времени находится вне зоны видимости телескопов (угол между соседними лучами составляет $\approx 60^0$). Таким образом, возможна ситуация, что блеск астероида достаточен, чтобы он мог быть обнаружен вблизи перигелия, на расстоянии в 1 а.е. от Солнца и от телескопа, но недостаточен, чтобы он мог быть обнаружен в тот момент, когда пересекает сканируемую область.

Какие возможны пути преодоления указанной проблемы? Один вариант – чтобы система КА патруля вращалась в противоположную сторону – навстречу Земле и основной массе АСЗ. Однако на практике реализация такого варианта требует слишком больших энергозатрат. Второй вариант – увеличить радиус орбиты, по которой движутся КА, так, чтобы астероид как можно глубже погружался внутрь области, ограниченной плоскостями оптического барьера. Но при этом увеличится рабочее расстояние телескопов, и, поскольку луч телескопа будет располагаться дальше от Солнца – меньше будет блеск астероидов. К тому же будет усугубляться аналогичная проблема с астероидами группы Атон, у которых $q < 1$, $Q \approx 1$. Третий вариант – увеличить ширину сканируемой области.

Этот вариант представляется, по существу, основным, так как помимо главной задачи – обнаружения подвижных объектов, есть еще одна задача, которую необходимо решать при организации патруля. Это – оценка потенциальной опасности обнаруженных объектов. Потенциально опасными называются космические объекты, которые сближаются с орбитой Земли на расстояние менее 0.05 а.е. [5]. Чтобы провести такую оценку, необходимо по

возможности точнее определить орбиту КО. А для этого необходимо иметь как можно больше наблюдений КО. При этом желательно, чтобы и диапазон углов, и временной интервал, на которых наблюдается объект, были по возможности больше. Поэтому, чем шире область, которую смогут контролировать телескопы патруля, тем более надежной будет оценка опасности обнаруживаемых объектов.

4. Трудности, связанные с формой и положением орбиты КО.

Еще одна проблема возникает для астероидов с большим наклоном орбиты, поскольку добавляется пространственная координата, из-за которой может значительно увеличиться расстояние от астероида, пересекающего область оптического барьера, как до Солнца, так и до телескопа. В табл.5 представлены данные о том, каковы условия наблюдения астероида KB 2000, с наклоном $i = 56.3^0$, на одном из витков, при некотором, не очень удачном «начальном» положении КА. Видно, что минимальное расстояние до Солнца равно 1.35 а.е., при этом расстояние до телескопа – 1.34 а.е. Минимальное расстояние до телескопа – 1.08 а.е., при этом расстояние до Солнца – 1.45 а.е. И это при том, что $q = 0.47$ а.е., т.е. астероид входит далеко внутрь области барьера.

Анализ взаимного положения орбит Земли и астероида позволил выявить причину такой неудачной работы оптического барьера. Это – большое расстояние между орбитами, превышающее 0.5 а.е. На рис.4 приведен наглядный пример особо неудачного расположения орбиты астероида (с наклоном 90^0) по отношению к орбите Земли и оптическому барьеру.

Данные примеры показывают, что среди АСЗ существуют астероиды, по отношению к которым предложенная схема оптического барьера работает плохо.

Табл.5. Условия наблюдения астероида КВ 2000

($q = 0.47$, а.е., $Q = 4.2$ а.е., $i = 56.3^{\circ}$, $\omega = 185^{\circ}$): № КА – порядковый номер КА; t – момент наблюдения (в сутках от момента прохождения перигелия); r , Δ – расстояния от астероида до Солнца и до телескопа; u_A^G , u_A^V – угловое положение астероида (в горизонтальной и вертикальной плоскостях); u_T – угол возвышения (центральной оси) луча телескопа над плоскостью эклиптики.

№ КА Направление	t [сутки]	u_T [град]	u_A^G [град]	u_A^V [град]	r [а.е.]	Δ [а.е.]
5 назад	-83.3	171.9	173.4	46.9	1.52	1.52
	-82.3	172.9	173.5	46.7	1.51	1.52
	-81.3	173.9	173.6	46.6	1.50	1.51
	-80.3	174.9	173.7	46.4	1.49	1.51
3 вперед	-79.3	294.8	295.9	49.0	1.47	1.44
	-78.3	296.8	296.3	49.2	1.46	1.43
	-77.3	297.8	297.7	49.5	1.45	1.42
	-76.3	298.8	299.3	49.7	1.44	1.41
	-75.3	299.8	300.8	49.9	1.42	1.40
4, назад	-77.3	117.8	118.8	85.9	1.45	1.08
1 назад	69.7	82.7	81.7	-44.7	1.35	1.34
	70.7	83.7	83.2	-44.4	1.36	1.35
	71.7	84.7	84.7	-44.1	1.37	1.37
	72.7	85.7	86.2	-43.8	1.39	1.38
	73.7	86.7	87.7	-43.5	1.40	1.39
	74.7	87.6	89.1	-43.2	1.41	1.41
5 вперед	71.7	204.7	205.6	-43.3	1.37	1.39
	72.7	205.7	205.6	-43.4	1.39	1.39
	73.7	206.7	205.7	-43.5	1.40	1.39

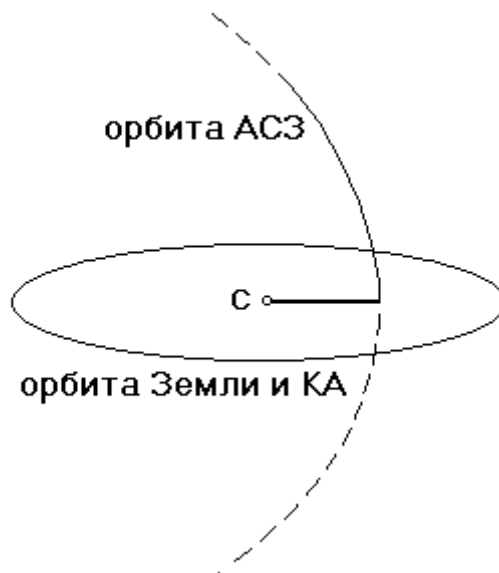


Рис.4. Пример АСЗ, особенно неудобного для наблюдения.

5. Класс «опасных» КО.

Но эти астероиды выделяются тем, что их орбиты далеки от орбиты Земли, и они не представляют опасности для Земли. Таким образом, становится понятно, что при анализе и выборе параметров оптического барьера нет необходимости учитывать все АСЗ, а надо сосредоточить внимание на потенциально опасных астероидах. То есть на астероидах, а также других космических объектах, которые сближаются с орбитой Земли на расстояние менее 0.05 а.е.

Особо рассмотрим «опасные» КО, орбиты которых пересекаются с орбитой Земли. Это орбиты с $q \leq 1$, $Q \geq 1$, $0 \leq i \leq 90^\circ$. При заданных q , Q ($q \neq Q$) параметр ω может принимать одно из двух значений (см. рис.5): $\omega_1 = \theta^*$ или $\omega_2 = \pi - \theta^*$, где θ^* – истинная аномалия точки орбиты, в которой радиус-вектор равен радиусу орбиты Земли, т.е. 1 а.е.:

$$R_3 = p / (1 + e \cdot \cos \theta^*), \quad \Rightarrow$$

$$\theta^* = \arccos[(p / R_3 - 1) / e], \quad e = (Q - q) / (Q + q), \quad p = 2 \cdot q \cdot Q / (Q + q).$$

Параметр орбиты Ω можно считать изменяющимся в диапазоне $[0, 60^\circ)$, как угловое расстояние узла от одного из КА в «начальный» момент времени

$t_H = \tau = 0$. Выделенный подкласс «опасных» орбит, таким образом, состоит из двух 4-параметрических семейств, зависящих от параметров q , Q , i , Ω . В расчетах будем рассматривать следующие диапазоны изменения этих параметров: $q \in [0.1, 1]$, $Q \in [1, 8]$, $i \in [0, 90^\circ]$, $\Omega \in [0, 60^\circ]$, $q \neq Q$.

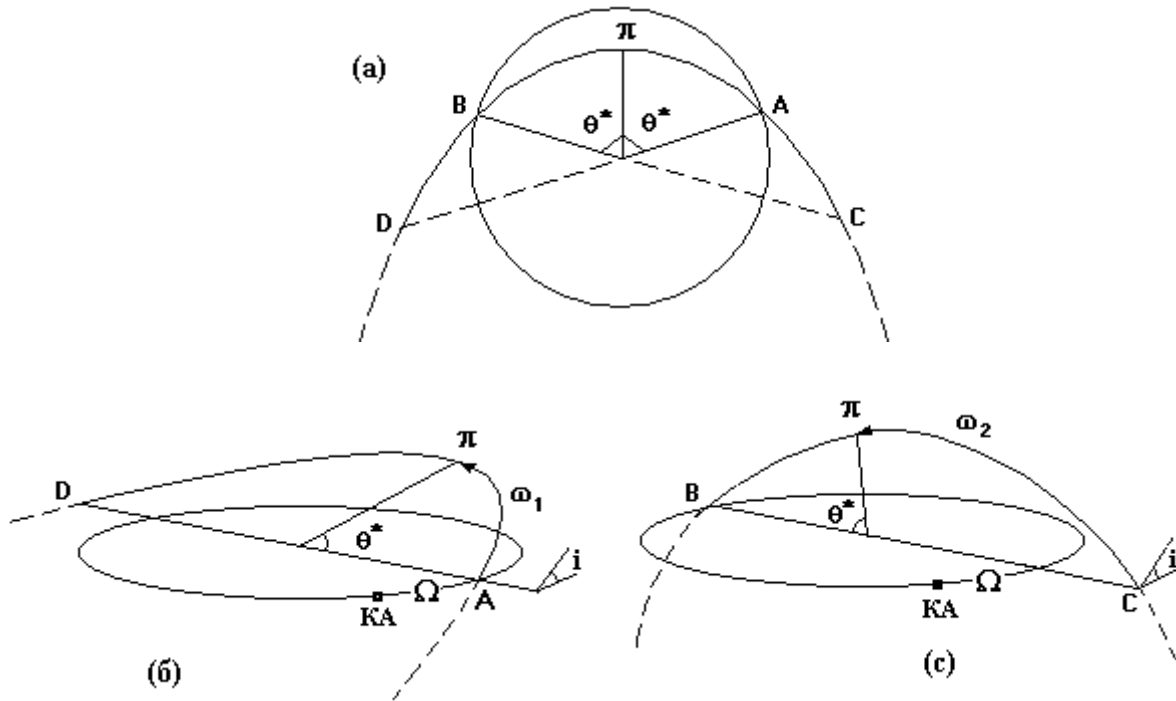


Рис.5. Подкласс «опасных» орбит, пересекающих орбиту Земли.

Одним из главных следствий коррекции требований к оптическому барьеру является то, что появляется возможность существенно уменьшить диапазон сканирования в вертикальном направлении. Поскольку интересующие нас объекты обязательно появляются вблизи орбиты Земли – в этой области и необходимо их отслеживать.

Оценим, какими могут быть вертикальные составляющие угловой скорости. Для сильно вытянутой орбиты, близкой к параболе, с постоянной энергии $h \approx 0$, из интеграла энергии $V^2 = 2\mu/r + h$ для $r = 1$ а.е. получаем $V \approx 42$ км/с. Угловая скорость в вертикальной плоскости будет максимальной для орбиты с наклоном в 90° , и на расстоянии в 1 а.е. от телескопа составит 42 км/с / 150 млн.км $\approx 1.4^\circ$ / сутки. На расстоянии в 0.5 а.е. она составит $\approx 2.8^\circ$ / сутки.

6. Схема оптического барьера со сканированием горизонтальной полосы.

В результате от первоначальной идеи сканирования узкой вертикальной полосы мы приходим к варианту сканирования узкой горизонтальной полосы. Чтобы угловые скорости пролетающих объектов были небольшими, рабочая область каждого телескопа должна располагаться в окрестности соседнего КА. На рис.6(а) через I обозначена рабочая область телескопа, расположенного на КА₂, и направленного «вперед» по ходу движения КА₂; IV – рабочая область телескопа, расположенного на КА₂, и направленного «назад». Через II и III обозначены области в окрестности КА₂, которые должны обозреваться телескопами, расположенными на КА₃ и КА₁.

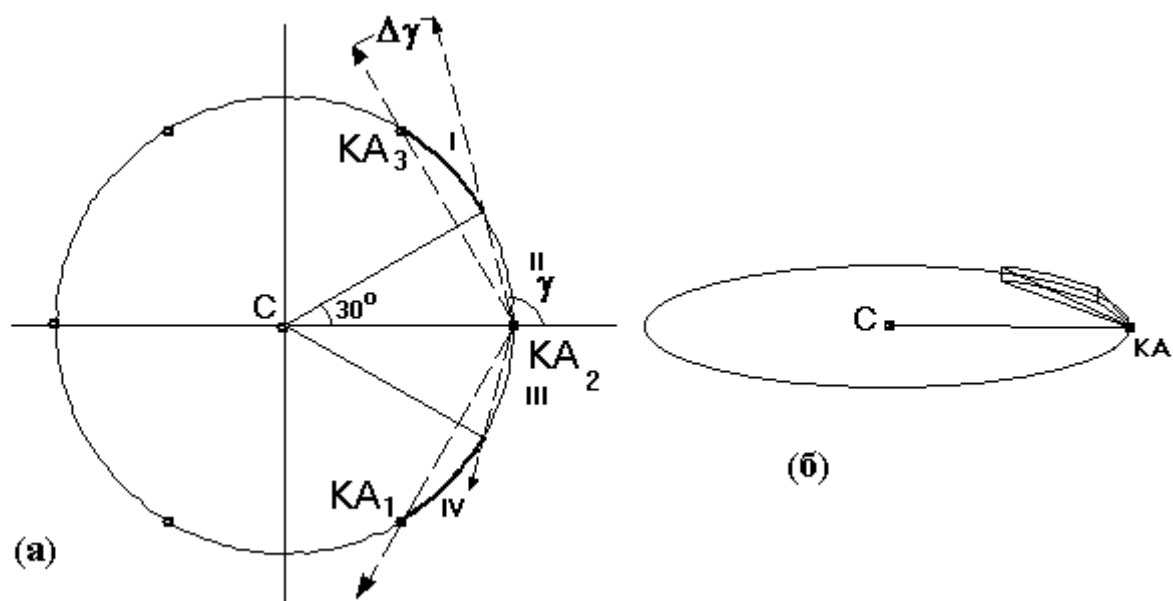


Рис.6. Вариант оптического барьера со сканированием узкой горизонтальной полосы: (а) I,IV – рабочие области телескопов, расположенных на КА₂; (б) часть телесного угла, обозреваемого одним из телескопов.

Для области I диапазон углов $\gamma \in [105^0..120^0]$. Следовательно, «длина» горизонтальной полосы $\Delta\gamma = 15^0$, с центром в $\gamma = 112.5^0$. Основной рабочий диапазон дальностей каждого телескопа $r \in [0.52..1]$ а.е. Так как минимальное расстояние от телескопа до астероида для рабочей области равно 0.52 а.е., то «ширина» горизонтальной полосы должна быть не менее

2.7⁰. Расчеты для обозначенного выше класса «опасных» орбит показали, что необходимо обеспечить небольшое перекрытие рабочих областей, увеличив «длину» сканируемой полосы до $\Delta\gamma = 15.6^0$. В результате площадь оптического барьера, т.е. площадь области I, составит ≈ 42 квадратных градуса, что на порядок меньше по сравнению с вариантом сканирования вертикальной полосы ($180^0 \times 3^0 = 540$ кв. градусов).

Оценим время, необходимое для сканирования такой области. Предположим, что рабочее поле телескопа – $1.6^0 \times 1.6^0$, продолжительность экспозиции – 100 секунд [6]. В таком случае потребуется 20 кадров, чтобы просканировать область I (рис.6а) размером $15.6^0 \times 2.7^0$. Продолжительность сканирования составит 2000 сек., или 34 минуты. Для выполнения главной задачи оптического барьера – обнаружения движущихся на фоне звезд КО, необходимо иметь несколько (по крайней мере два) снимков одного и того же участка неба. Чтобы в дальнейшем не потерять этот объект, необходимо оценить параметры его орбиты, а для этого надо иметь по крайней мере 4 снимка, т.е. просканировать область барьера 4 раза, затратив на это 2.25 часа.

Для сравнения отметим, что при сканировании вертикальной полосы шириной 3^0 и длиной 180^0 , необходимо 2×113 кадров, и 377 минут, или 6 часов и 17 минут. А четырехкратное сканирование области барьера потребует более 25 часов. В последнем случае пришлось бы либо уменьшить время экспозиции до 96 секунд, либо сузить диапазон сканирования в вертикальной плоскости до $\approx [-86^0, 86^0]$.

7. Стратегия наблюдения за КО.

Относительно малое время, требуемое для обнаружения подвижных объектов в варианте оптического барьера со сканированием горизонтальной полосы, позволяет полностью перестроить логику наблюдения, и решать бортовыми средствами космического патруля задачу оценки потенциальной опасности обнаруженных объектов, при этом отказавшись от высказанной

выше необходимости увеличения области барьера, и необходимости ее четырехкратного сканирования. Тем более, что даже увеличение ее в несколько раз может быть недостаточным для надежной оценки потенциальной опасности КО. При наблюдениях АСЗ с Земли уже сложилась практика двухэтапной стратегии поиска новых астероидов: первоначального 4-5 кратного сканирования определенных участков неба с целью обнаружения подвижных на фоне звезд КО, и последующего сопровождения их, часто с помощью других телескопов – для уточнения их орбит.

Подобную двухэтапную стратегию можно было бы применить и в данном случае. На первом этапе стоит задача обнаружения КО, пересекающих (узкую – шириной 2.7^0) область оптического барьера – названная выше главной задачей барьера. Если ограничиться двукратным сканированием, на это потребуется ≈ 1 час и 7 минут. Все остальное время суток может быть отдано второму этапу – сопровождению обнаруженных ранее, в предыдущие несколько суток, КО. Сопровождение должно осуществляться только для новых объектов, то есть предварительно необходимо осуществить отсев части обнаруженных КО, которые могут быть идентифицированы как уже известные. После того, как удастся оценить параметры орбиты (для этого необходимо иметь по крайней мере 4 положения объекта), к наблюдению за ним могут быть подключены другие телескопы, и в первую очередь тот, вблизи которого находится объект. Подобная поддержка сопровождения КО телескопами с разных КА позволит значительно улучшить точность оценки их орбит.

Например, если с КА₃ будет обнаружен КО А₁ в области II (рис.7), то последующее сопровождение его должно вестись с КА₂. Если КО будет обнаружен на стадии удаления от Солнца, то условия наблюдения с КА₂ будут особенно благоприятными. Если же КО А₂ будет обнаружен с КА₁ на стадии сближения с Солнцем, и окажется вблизи КА₂ в (заштрихованной) области, неудобной для наблюдения с КА₂, то для последующего его сопровождения может быть подключен КА₃. Возможно, в этом случае из-за

большей удаленности КО от КА₃ может потребоваться несколько большее время экспозиции.

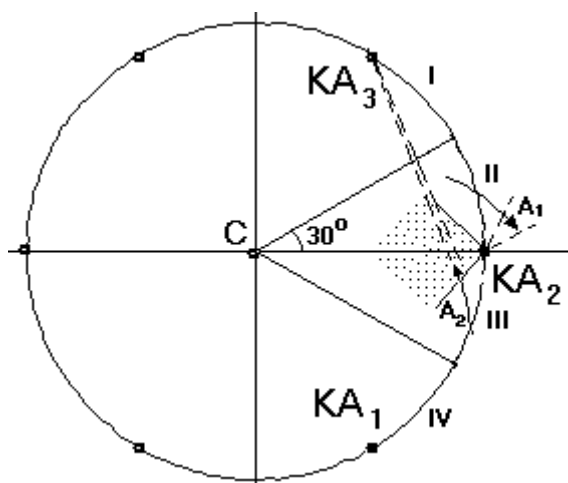


Рис.7. Сопровождение КО телескопами с разных КА.

Если сопровождение всех новых объектов превысит возможности телескопа, часть КО, имеющих большую угловую скорость движения, должна быть на данном этапе отфильтрована. Большая угловая скорость, превышающая 3^0 в сутки – признак того, что этот объект пролетает слишком близко от данного телескопа. Значит, он находится в основной рабочей зоне другого телескопа, который и должен заниматься его сопровождением на первом этапе. Таким образом будет сокращено дублирование в работе патруля, хотя при этом большинство мелких объектов будет вообще исключено из задачи сопровождения, так как с того телескопа, в рабочую область которого они попадают, они не будут обнаружены из-за их размеров. Так как количество АСЗ быстро растет с уменьшением их диаметра (см. табл. 6 из [6]), подобная фильтрация может заметно снизить нагрузку на работу телескопов.

Табл.6. Оценка количества N АСЗ, диаметр D которых превышает указанное значение.

D	> 2 км	> 1 км	> 500 м	> 100 м	> 10 м
N	400	2100	9200	320,000	150,000,000

Продолжительность сопровождения обнаруженных новых объектов может быть разной. Минимальная цепочка должна состоять из двух наблюдений в течение первых суток, чтобы иметь в сумме 4 положения КО, необходимых для оценки параметров его орбиты. После чего можно будет попытаться определить, представляет ли он опасность для Земли. Поскольку орбита известна всегда с определенной погрешностью, возникает эллипсоид рассеяния, с учетом которого необходимо выяснять, пересекает ли объект окрестность Земли на расстоянии, меньшем 0.05 а.е., или нет. И здесь становится видным еще одно преимущество нового варианта барьера по сравнению с первоначальным. В случае барьера с вертикальным сканированием объект может быть обнаружен в самых разных точках орбиты (например, в т. А на рис.8а). Чтобы определить, попадает ли он в близкую окрестность Земли, может потребоваться спрогнозировать его движение на протяженном интервале времени – до точек В и D. При этом эллипсоид рассеяния быстро растет, а с ним и неопределенность в отношении того, как близко от орбиты Земли проходит КО. В результате, для решения вопроса о потенциальной опасности КО, необходимо увеличивать продолжительность наблюдения за ним.

В новой схеме мы имеем возможность наблюдать за объектом в непосредственной близости от орбиты Земли, что облегчает решение вопроса. Например, если объект будет обнаружен в т. А на рис.8б, т.е. далеко от орбиты Земли, то мы делаем (предварительное) заключение, что он не представляет опасности для Земли, и прекращаем наблюдение за ним. В действительности этот объект представляет опасность для Земли. Но выяснение вопроса, как сильно он сближается с орбитой Земли в окрестности точки D, откладывается до момента, когда он будет обнаружен в окрестности этой точки. Таким образом, решение вопроса о потенциальной опасности объекта и необходимости его дальнейшего сопровождения мы можем принимать «локально», имея небольшой объем данных наблюдения, на основе текущей приближенной оценки параметров его орбиты.

Итак, если на основании проведенных наблюдений выяснится, что в наблюдаемой области КО проходит на достаточно большом расстоянии от орбиты Земли – дальнейшее наблюдение за ним прекращается. Если же погрешность в знании его орбиты не позволяет надежно решить вопрос о его опасности, или выяснится, что он представляет опасность для Земли, наблюдение за ним должно быть продолжено, чтобы определить параметры орбиты с достаточной точностью. При этом последующие наблюдения должны вестись с того КА, с которого объект лучше виден. В конце концов, к задаче наблюдения потенциально опасных КО и уточнению параметров их орбит должны быть подключены и телескопы на Земле.

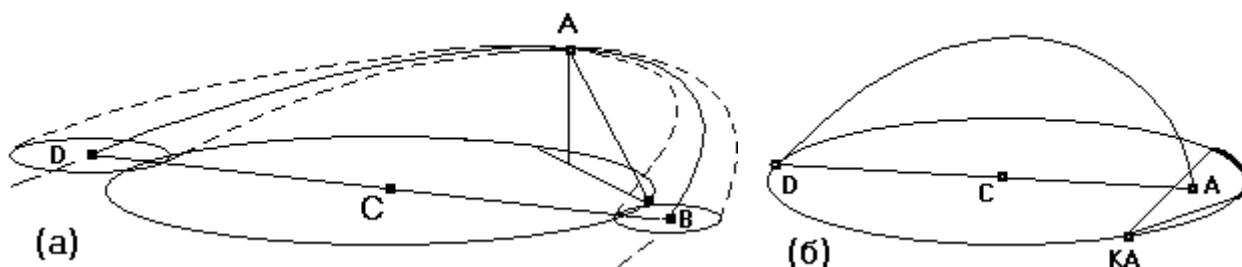


Рис.8. Определение потенциальной опасности КО в схемах сканирования (а) вертикальной и (б) горизонтальной полосы.

8. Класс «потенциально опасных» КО.

До сих пор все, что касается схемы горизонтального сканирования, относилось к подклассу «опасных» орбит. Узкая полоса «шириной» 2.7° (размер полосы по вертикали) позволяет надежно обнаруживать КО вблизи орбиты Земли (доступные наблюдению по звездной величине), так как «опасные» объекты пересекают в этот момент орбиту Земли и плоскость эклиптики и обязательно попадают в узкую полосу сканирования. Но по отношению к более широкому классу орбит – «потенциально опасных» – это уже не так. «Потенциально» опасные объекты в какой-то момент обязательно попадут в окрестность орбиты Земли, представляющую собой тор «толщиной» 0.1 а.е. (рис.9а). В этот момент они могут находиться на

расстоянии ≈ 0.05 а.е. (рис.9б) от плоскости эклиптики (ОА) и на расстоянии ≈ 0.52 а.е. от телескопа (АТ), т.е. под углом $\approx 5.5^\circ$ к «горизонту», и поэтому не попадут в полосу сканирования «шириной» 2.7° (в диапазон углов $[-1.35^\circ, 1.35^\circ]$ по вертикали). При дальнейшем движении, вблизи плоскости эклиптики, они обязательно войдут в поле зрения какого-то из телескопов. Но к тому моменту они могут находиться уже на значительном удалении и от Солнца, и от телескопа.

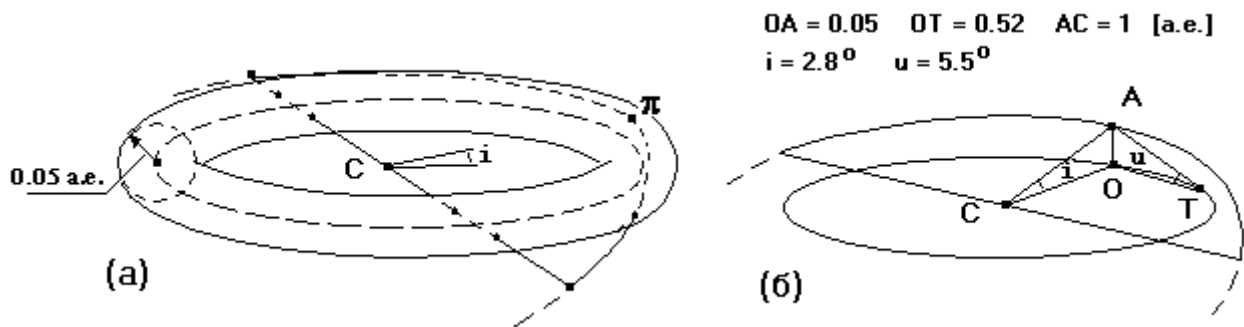


Рис.9. «Потенциально» опасные КО – сближающиеся с орбитой Земли до расстояния, меньшего 0.05 а.е.

Например, (гипотетический) объект, орбита которого имеет $q = 1$, $Q = 8$ а.е., $i = 2.8^\circ$, $\omega = 90^\circ$ (рис.9а,б), относится к классу «потенциально» опасных: в перигелии его расстояние до Солнца равно 1 а.е., а расстояние до плоскости эклиптики – 0.049 а.е. Условия наблюдения за ним (в одном из вариантов неудачного «начального» положения КА патруля относительно его орбиты) представлены в табл.7. Они подтверждают сказанное: в те моменты времени, когда астероид попадает в поле зрения телескопов, расстояние до них превышает 1.8 а.е., а расстояние до Солнца – 1.5 а.е. При этом блеск астероида, а значит и возможность его реального обнаружения, падают существенно.

Чтобы и такие объекты патруль мог наблюдать вблизи орбиты Земли, необходимо увеличить размер области сканирования в вертикальном направлении до $5.5^\circ \times 2 = 11^\circ$, то есть в ≈ 4 раза (см. табл.8). Тогда в области оптического барьера КО будут наблюдаться по крайней мере в течение 4-х

суток. В некоторых случаях, при небольших наклонениях орбиты, как видно из табл.7, КО может наблюдаться средствами барьера до 20 и более суток. При рабочем поле телескопа $\approx 1.6^0 \times 1.6^0$ область $15.6^0 \times 11^0$ потребует $10 \times 7 = 70$ кадров, на его двухкратное сканирование понадобится около 4 часов при 100 секундах экспозиции на кадр. Остальное время может быть уделено задаче сопровождения отдельных КО.

Табл.7. Условия наблюдения «потенциально» опасного астероида с $q = 1$ а.е., $Q = 8$ а.е., $i = 2.8^0$, $\omega = 90^0$ при сканировании области размером 15.6^0 (по горизонтали) на 2.7^0 (по вертикали): №КА – порядковый номер КА; t – момент наблюдения (в сутках от момента прохождения перигелия); r , Δ – расстояния от астероида до Солнца и до телескопа; u_A – угловое положение астероида.

№ КА (направление)	t [сутки]	u_T [град]	r [а.е.]	Δ [а.е.]
1 (назад)	-110..-84	326.2..336.6	1.82..1.56	1.81
4 (вперед)	85..111	203.5..213.9	1.57..1.83	1.81..1.80

Табл.8. Условия наблюдения астероида с $q = 1$ а.е., $Q = 8$ а.е., $i = 2.8^0$, $\omega = 90^0$ (того же, что и в табл.7), при сканировании области размером 15.6^0 (по горизонтали) на 11^0 (по вертикали). Случаи попадания астероида в поле зрения телескопов на большом удалении, как в табл.6, опущены.

№ КА (направление)	t [сутки]	u_T [град]	r [а.е.]	Δ [а.е.]
6 (назад)	-17..2	358.2..16.8	1.03..1.00	0.62..0.51
5 (вперед)	-1..17	163.5..181.2	1.00..1.03	0.51..0.61

9. Зависимость блеска КО от условий наблюдения.

Слабым местом изложенной схемы является то, что «потенциально» опасные КО, на выявление которых направлен оптический барьер, наблюдаются под фазовыми углами $\varphi \approx 60^0 - 75^0$. Фазовый угол – угол между направлениями от астероида на Солнце и на телескоп ($\varphi = \angle CAT$ на рис.9б). В табл. 9 показано, как сильно падает блеск астероида E (E_φ – коэффициент ослабления) и изменяется видимая звездная величины m (Δm – величина изменения) с увеличением фазового угла. В таблице $\Delta m = -2.5 \cdot \log E_\varphi$; $E_\varphi = (1 - G) \cdot F_1 + G \cdot F_2$ – коэффициент ослабления блеска, обусловленный фазовым углом φ ; $F_1 = \exp[-3.33 \cdot \text{tg}^{0.63}(\varphi/2)]$, $F_2 = \exp[-1.87 \cdot \text{tg}^{1.22}(\varphi/2)]$. Параметр G из-за недостатка реальных наблюдений определен для небольшого числа АСЗ: в каталоге 2001 г. он приведен лишь для 9 астероидов из 1366. Среди них есть одно отрицательное значение: -0.12 (астероид Alinda), остальные 8 изменяются в диапазоне от 0 (Betulia) до 0.6 (Ivar), а для подавляющего большинства АСЗ параметр G принят равным среднему значению 0.15.

Видимая звездная величина $m = -2.5 \log E$; абсолютная звездная величина $m_{ABS} = -2.5 \log E_0$. Блеск $E = E_0 \cdot E_R \cdot E_\varphi$, где $E_R \equiv 1 / (r_{AC} \cdot r_{AT})^2$ – коэффициент ослабления блеска, обусловленный расстоянием до Солнца r_{AC} и до телескопа r_{AT} . По этим показателям, которые зависят от фазового угла и от расстояния КО до Солнца и до телескопа, хуже всего условия наблюдения в дальней области барьера, где фазовый угол равен 60^0 , а расстояние до телескопа ≈ 1 а.е. Блеск астероида в сравнении с $\varphi = 0$ уменьшается в 6-11 раз (для G из диапазона $[0..0.25]$), что эквивалентно увеличению звездной величины m примерно на $2 \div 2.5$ единицы.

В табл. 10 приведены данные о том, каких размеров объекты доступны для наблюдения в телескоп, в зависимости от его проникающей силы [5]. Так, если телескоп позволяет обнаруживать объекты 22 звездной величины, то в «номинальном» случае – при условии, что фазовый угол φ равен нулю, и

коэффициент ослабления E_R равен 1, минимальные размеры астероидов, доступных для наблюдения, составят от 105 до 236 м в диаметре – в зависимости от геометрического альбеда, которое для АСЗ в основном изменяется в диапазоне $0.05 \div 0.25$.

Табл.9. Изменение Δm видимой звездной величины m и коэффициента E_φ ослабления блеска E астероида с изменением фазового угла φ .

φ	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	
Δm	0.00	0.78	1.21	1.58	1.91	2.24	2.56	2.89	3.24	3.62	4.04	4.53	G=0
E_φ	1.00	0.49	0.33	0.23	0.17	0.13	0.09	0.07	0.05	0.04	0.02	0.02	
Δm	0.00	0.65	1.00	1.30	1.58	1.86	2.15	2.46	2.79	3.18	3.63	4.17	G=0.15
E_φ	1.00	0.55	0.40	0.30	0.23	0.18	0.14	0.10	0.08	0.05	0.04	0.02	
Δm	0.00	0.57	0.88	1.15	1.41	1.67	1.94	2.24	2.58	2.96	3.42	3.98	G=0.25
E_φ	1.00	0.59	0.45	0.35	0.27	0.22	0.17	0.13	0.09	0.07	0.04	0.03	

Табл.10. Размеры АСЗ, доступных для наблюдения в телескоп с проникающей силой m_{ABS} . Здесь m_{ABS} – абсолютная звездная величина; D – (минимальный) диаметр астероида : нижняя граница диапазона соответствует значению 0.25, верхняя – значению 0.05 геометрического альбеда астероида.

m_{ABS}	18	19	20	21	22	23
$D[m]$	665÷1488	420÷939	265÷592	167÷374	105÷236	67÷149

В нашем случае – для объекта, находящегося в дальней части оптического барьера, на расстоянии ≈ 1 а.е. как от Солнца, так и от телескопа, коэффициент ослабления $E_R \approx 1$, а из-за фазового угла $\varphi \approx 60^\circ$ оказываются доступными для наблюдения лишь объекты < 20 абсолютной звездной величины, с минимальным диаметром 282÷635 м. В ближней части оптического барьера расстояние до телескопа уменьшится до 0.52 а.е., из-за чего E_R возрастет в 3.7 раза, но из-за увеличения фазового угла φ с 60° до 75°

E_{φ} уменьшится в ≈ 1.55 раза, и в целом блеск увеличится лишь в ≈ 2.4 раза. В результате, в ближней части оптического барьера этим телескопом могут быть обнаружены объекты в $\sqrt{2.4} \approx 1.55$ раза меньшие по диаметру, или $282 \div 635$ м. То есть объекты < 21 абсолютной звездной величины. Если проникающая способность телескопа – объекты 21 звездной величины, то размеры минимально доступных для наблюдения астероидов увеличатся в 1.585 раза, составив $447 \div 1007$ для дальней части барьера, и $289 \div 647$ м – для ближней. Эти оценки сделаны для значения параметра наклона $G=0.15$.

10. Характеристики оптического барьера для различных орбит патруля.

В связи с этим представляет интерес идея разместить космические аппараты патруля на орбите Венеры [6,7], так как возникает возможность наблюдать объекты, появляющиеся в окрестности орбиты Земли, на малых расстояниях от телескопа и малых фазовых углах, когда они особенно ярки.

Рассмотрим варианты размещения КА патруля на орбите радиуса $R_{орб} < 1$ а.е. На рис.10 С – Солнце; А – астероид (на орбите Земли) в дальней части рабочей области барьера I для телескопа Т, расположенного на КА₂.

Основные (приближенные) геометрические характеристики патруля получим из $\Delta СВТ$ и $\Delta АВТ$: $СТ = R_{орб}$, $СВ = R_{орб} \cdot \cos\alpha$, $ВТ = R_{орб} \cdot \sin\alpha$, $АВ = 1 - СВ$ [а.е.], $\Delta^2 = (ВТ)^2 + (АВ)^2$, $\text{tg}\varphi = ВТ/АВ$, $\gamma = \alpha + \varphi$. Область сканирования: дальняя часть $\alpha = 60^0$, ближняя $\alpha = 30^0$. Соответствующий диапазон углов γ определяет длину полосы сканирования $\Delta\gamma$; ее высота $\Delta\beta$ определяется условием $\text{tg}(\Delta\beta/2) = 0.05\text{а.е.}/\Delta$, где Δ – расстояние до ближней части области сканирования. Площадь полосы $S = \Delta\gamma \cdot \Delta\beta$ в квадратных градусах; $2T_C$ – время, необходимое для двукратного сканирования ее телескопом с рабочим полем $1.6^0 \times 1.6^0$ при 100 с экспозиции на кадр. Все эти параметры приведены в табл.11 для трех значений $R_{орб}$: 1, 0.7 и 0.4 а.е. – это примерно орбиты Земли, Венеры и Меркурия.

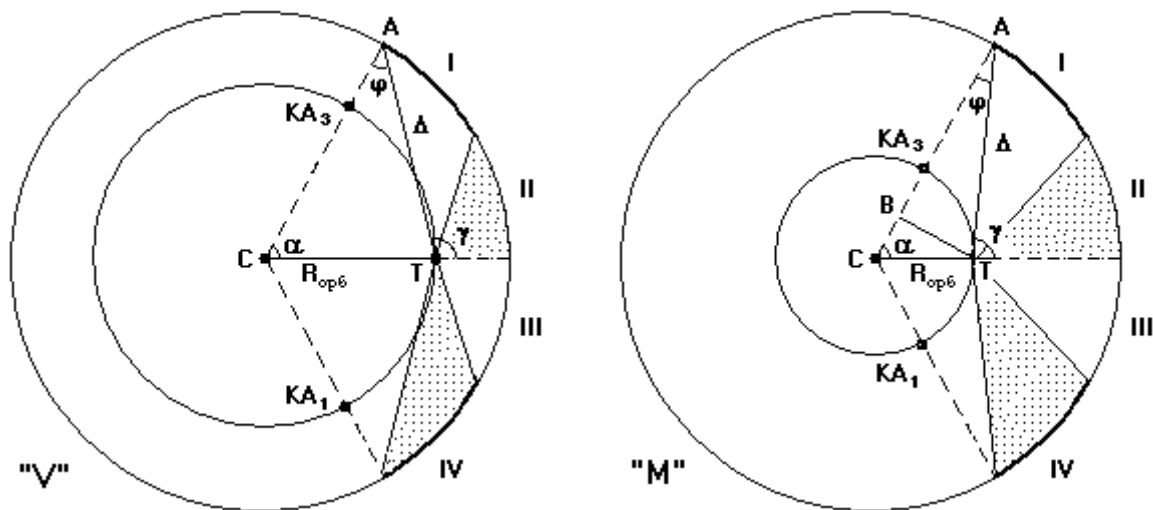


Рис.10. Оптический патруль на орбитах Венеры ("V") и Меркурия ("M"):

С – Солнце; А – астероид (на орбите Земли) в дальней части рабочей области барьера I для телескопа Т, расположенного на КА₂; R_{орб} – радиус орбиты КА патруля; Δ – расстояние до астероида / точки на орбите Земли; φ – фазовый угол; I,IV – рабочие области барьера для телескопов на КА₂; II,III – рабочие области барьера для телескопов на КА₃ и КА₁; сектора II,III – рабочие области для телескопов на КА₂ на этапе сопровождения КО.

Табл.11. Характеристики оптического барьера для различных орбит размещения КА патруля.

R _{орб}	α	φ	E _φ	Δ	E _R ·E _φ	γ	Δγ, Δβ	S,2T _с
1 «Земля»	30 ⁰	75 ⁰	0.09	0.52	0.33	105.0 ⁰	15.0 ⁰	165 ⁰ кв ≈ 4 ч
	60 ⁰	60 ⁰	0.14	1.00	0.14	120.0 ⁰	11.0 ⁰	
0.7 «Венера»	30 ⁰	41.6 ⁰	0.22	0.53	0.81	71.6 ⁰	31.4 ⁰	340 ⁰ кв ≈ 8 ч
	60 ⁰	43.0 ⁰	0.22	0.89	0.27	103.0 ⁰	10.9 ⁰	
0.4 «Меркурий»	30 ⁰	17.0 ⁰	0.44	0.68	0.93	47.0 ⁰	36.4 ⁰	305 ⁰ кв ≈ 8 ч
	60 ⁰	23.4 ⁰	0.36	0.87	0.48	83.4 ⁰	8.4 ⁰	

Там же приведены коэффициенты ослабления блеска E. Площадь области барьера для вариантов «Венера» и «Меркурий» различаются не сильно: 340 и 305 квадратных градусов, и в обоих случаях примерно 8 часов время сканирования. Но это примерно вдвое больше, чем для «Земли»: 165

кв. градусов и около 4 часов. Блеск КО слабее в дальней части барьера. При размещении КА на орбите Земли коэффициент ослабления в худшем случае равен 0.17, на орбите «Венеры» – 0.32, на орбите «Меркурия» – 0.54. Это значит, что во втором варианте доступны для наблюдения в 1.4, а в третьем – в 1.8 раза меньшие по диаметру объекты, чем в первом (табл.12).

Табл.12. Размеры астероидов (диаметр в метрах), доступных для наблюдения в ближней и дальней части оптического барьера телескопом с проникающей силой в 22 звездную величину. Параметр наклона G принят равным 0.15.

«Земля»		«Венера»		«Меркурий»	
182–408	282–635	117–263	201–452	109–244	152–342

Замечание. Все эти оценки приближенные, так как не в полной мере учитывают толщину тора, и не учитывают необходимость частичного перекрытия кадров и соседних областей барьера [10].

Для вариантов «Венера» и «Меркурий» можно, в принципе, вместо областей I и IV выбрать в качестве барьера области II и III. В этом случае площадь барьера и время сканирования возрастут примерно в 4 и 1.5 раза соответственно (табл.13,14). Отметим, однако, что оценки времени сканирования области барьера существенно зависят от величины рабочего поля телескопа. При увеличении угла раствора телескопа в два раза площадь рабочего поля возрастет в 4 раза, и примерно во столько же раз уменьшится время сканирования области барьера.

Табл.13. Характеристики оптического барьера, области II,III (см.рис.10).

$R_{\text{ОРБ}}$	α	φ	E_{φ}	Δ	$E_R \cdot E_{\varphi}$	γ	$\Delta\gamma, \Delta\beta$	$S, 2T_c$
0.4, обл. II, III «Меркурий»	0^0 30^0	0^0 17.0^0	1 0.44	0.6 0.68	2.78 0.93	0^0 47.0^0	47.0^0 9.5^0	$448^0_{\text{КВ}}$ $\approx 11.5\text{ч}$
0.7, обл. II, III «Венера»	0^0 30^0	0^0 41.6^0	1 0.22	0.3 0.53	11.1 0.81	0^0 71.7^0	71.7^0 19.2^0	$1356^0_{\text{КВ}}$ $\approx 30\text{ч}$

Табл.14. Размеры астероидов (диаметр в метрах), доступных для наблюдения в ближней и дальней части оптического барьера (области II,III) телескопом с проникающей силой в 22 звездную величину. Параметр наклона G принят равным 0.15.

«Меркурий», обл. II, III		«Венера», обл. II, III	
63–142	109–244	32–71	117–263

Во всех вариантах (табл.11,13), кроме последнего, время сканирования области барьера не превышает 12 часов, поэтому возможна специализация бортовых телескопов: один телескоп, с большим рабочим полем, будет сканировать (общую) область барьера, телескоп с меньшим рабочим полем, но большей разрешающей способностью (что позволит получать данные о положении КО с большей точностью) – заниматься сопровождением КО.

При взгляде на рис.10 бросается в глаза то, что площади секторов (часть из них заштрихована), которые доступны для обозрения телескопами на этапе сопровождения КО, значительно увеличиваются с уменьшением радиуса орбиты. А значит, появляется возможность наблюдать КО на большем отрезке времени, более протяженной части орбиты, и при лучших условиях наблюдения по расстоянию до КО и фазовому углу. И, в сравнении с вариантом «Земля», область, неудобная для наблюдения с $КА_2$ (см. рис.7), отодвинута далеко внутрь от орбиты Земли. Поэтому значительно лучше условия наблюдения астероидов группы Атон.

Однако, наряду с положительными моментами, связанными с уменьшением радиуса орбиты КА патруля, возникают и некоторые сложности. С увеличением размеров телесного угла, обозреваемого телескопом, возрастает количество «чужих» АСЗ, попадающих в поле зрения телескопа. Увеличивается угловая скорость движения КА по орбите (для Меркурия $\omega_0 > 4^0$ в сутки) и (непрерывного) поворота всей системы патруля в плоскости эклиптики, и изменяются «горизонтальные» составляющие угловых скоростей КО. Растет поток солнечной энергии, и встает проблема

отвода от КА излишков тепла, защиты аппаратуры от перегрева. Требуются большие энергозатраты для вывода КА на нужную орбиту. Все эти вопросы требуют дополнительного исследования.

11. Оценка напряженности работы телескопов.

Оценим, насколько велик может быть объем работы по сопровождению астероидов. В настоящее время список известных АСЗ составляет более 8 тысяч, из которых примерно шестая часть являются потенциально опасными. Периоды орбит «типичных» представителей группы Атона – астероидов 2062 Aten ($q=0.79$, $Q=1.14$ а.е., $T=347$ суток) и 10563 Izhdubar ($q=0.74$, $Q=1.28$, $T=369$ суток), составляют 0.95–1 год, а у «нетипичного» астероида 1989 VA ($q=0.3$, $Q=1.16$, $T=227$ суток) – 0.62 года. У «типичных» представителей группы Аполлона – астероидов 1620 Geographos ($q=0.83$, $Q=1.66$, $T=508$ суток) и 1862 Apollo ($q=0.65$, $Q=2.29$, $T=652$ суток) – соответственно 1.4–1.8 года, а у «нетипичных» 2000 KE41 ($q=0.4$, $Q=5.59$, $T=1897$ суток) и 5025 P-L(L) ($q=0.44$, $Q=7.96$, $T=3145$ суток) – 5.2 и 8.6 года, т.е. превышают 5 лет. Для оценки частоты появления астероидов вблизи орбиты Земли примем значение T равным 1 году.

Рассмотрим вариант барьера «Меркурий», области II,III. В ближней части барьера могут наблюдаться светлые астероиды диаметром от 63 м. Оценим количество астероидов такого размера. На краях диапазона $D \in [10, \dots, 100]$ количество астероидов соответственно 150 миллионов и 320000 (табл.5). Внутри диапазона их количество N можно оценить по формуле $\log N = 2.825 - 2.675 \log D$. Для $D=63$ м получим $N=1.09$ миллиона КО.

В таком случае, вблизи орбиты Земли ежедневно будет появляться ≈ 3000 «новых» объектов. «Новых» в том смысле, что они не наблюдались в области барьера в предыдущие сутки. Так как каждый телескоп обзоревает 1/12 часть орбиты Земли, то в его области оптического барьера в среднем должно появляться ежедневно по 250 «новых» объектов, из которых шестая часть, т.е. ≈ 42 – потенциально опасных. За редким исключением, КО будут

наблюдаться в области барьера 4 раза (в течение двух суток), на основании чего можно будет делать (предварительное) заключение об их опасности и необходимости их сопровождения. Считая, что для потенциально опасных объектов необходимо делать дополнительно еще ≈ 10 наблюдений (например, 4 наблюдения с одного КА, и 3 пары наблюдений с двух КА), получим, что в режиме сопровождения каждый телескоп должен ежедневно делать ≈ 420 снимков. При 100 секундах на кадр потребуется ≈ 11.7 часов, при 2.5 минутах – 17.5 часов.

Из использованных в оценке астероидов только треть (0.32 миллиона) размером больше 100 м, а большую часть составляют объекты размером менее 100 м. Из них только более светлые будут наблюдаться в области барьера, причем главным образом в ближней ее части. Поэтому оценка в 17.5 часов, по-видимому, является завышенной. Можно ожидать, что потребуется менее 12 часов, так что второй телескоп сможет осуществлять сопровождение всех объектов, обнаруженных в областях II, III.

Кроме того, имеется следующий резерв. Чтобы выявить подавляющую часть потенциально опасных КО, патруль должен работать не менее 5 лет. В первое время, когда большинство обнаруживаемых потенциально опасных КО являются новыми, сопровождение какой-то части из них, имеющих небольшой период обращения (менее 2.5 лет), может быть отложено на более поздние сроки: эти объекты появятся вблизи орбиты Земли по крайней мере еще один раз (а некоторые, с периодом около года – несколько раз). Постепенно, по мере выявления потенциально опасных КО и определения их орбит, все большая часть обнаруживаемых в области оптического барьера потенциально опасных объектов будет идентифицироваться как уже известные, не требующие последующего сопровождения. В результате нагрузка на работу телескопов будет уменьшаться, и появится возможность сопровождения астероидов с небольшим периодом обращения.

Автор выражает благодарность В.М.Агапову и Л.В.Еленину за полезные консультации.

Работа поддержана РФФИ, грант 09-01-00299а и НШ-6700.2010.1

Литература.

1. Т.М. Энеев. К вопросу об астероидной опасности. Материалы заседания Рабочей группы РАН "Риск и безопасность", Москва, 29.11.2000 г.
2. Т.М. Энеев. Об актуальных задачах исследования дальнего космоса. Космические исследования. 2005. Т.43, №6, с.403-407.
3. Timur M.Eneev, Georgy B.Efimov, Rauf Z.Akhmetshin, Grigory S.Zaslavsky. Space Patrol System, Proceedings of 17th International Symposium on Space Flight Dynamics, 16-20 June 2003, Moscow, Russia, pp.109-114.
4. Каталог АСЗ, версия 1.8, март 2001. Институт прикладной астрономии РАН. - Санкт-Петербург. 2001.
5. Пулковская страница ОСЗ,
<http://www.gao.spb.ru/personal/neo/RUS/General/p01.htm>;
Астероидно-кометная опасность (под редакцией А.Г. Сокольского),
<http://www.ipa.nw.ru/PAGE/DEPFUND/LSBSS/AKO/ch41.html>.
6. R. E. Gold. A Comprehensive Earth Protection system. A Phase I Report to the NASA Institute for Advanced Concepts. May 28,1999;
http://www.niac.usra.edu/files/studies/final_report/75Gold.pdf.
7. David W. Dunham, Anthony L. Genova. Using Venus for Locating Space Observatories to Discover Potentially Hazardous Asteroids. Malta Symposium on Hazardous Near Earth Asteroids, October 12, 2009.
8. Р.З.Ахметшин, Г.Б.Ефимов, Т.М.Энеев. Космический патруль: варианты схемы оптического барьера. Тезисы докладов XXXV Академических Чтений по космонавтике, 25 - 28 января, Москва, 2011. с.130.
9. Т.М. Энеев, Р.З. Ахметшин, Г.Б. Ефимов. К вопросу об астероидной опасности. Препринт ИПМ им. М.В.Келдыша РАН № 35, М., 2011. 40 с. http://library.keldysh.ru/prep_ls.asp
10. Т.М. Энеев, Р.З. Ахметшин, Г.Б. Ефимов. К вопросу об астероидной опасности. Космические исследования, 2012, т. 50, №2, с.99-108.