

# КОСМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОБНАРУЖЕНИЯ И ЗАБЛАГОВРЕМЕННОГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ О РАННЕ НЕИЗВЕСТНЫХ ОПАСНЫХ АСТЕРОИДАХ РАЗМЕРОМ БОЛЕЕ 50 М

Б.В. Бодин, В.А. Емельянов, Ю.Е. Левицкий, В.И. Лукьященко, И.Я. Черяпкин, В.Ф. Уткин

Центральный научно–исследовательский институт машиностроения, г. Калининград, Московской обл., Россия

В настоящее время нет системы раннего предупреждения об астероидной опасности. Наземные радиолокационные станции контроля околоземного космического пространства (ОКП) не обладают достаточной проникающей способностью для обнаружения небесных тел на огромных дальностях ( $\sim 0,1$  а. е. или 15 млн. км), достаточных для заблаговременного предупреждения об их падении на Землю. Наземные оптические средства контроля ОКП вследствие ограниченных погодными условиями и малым временем видимости небесных тел, не обладающих собственным излучением, в течение суток не могут обеспечить требуемый дозорный режим наблюдений всего ОКП. Поэтому предлагаемые в последнее время способы предупреждения о падении астероидов предусматривают использование оптико–электронных средств космического базирования

Известны предлагаемые способы выявления околоземных астероидов [1,2] с помощью искусственных спутников Земли, оснащенных телескопами со сверхшироким полем зрения ( $\sim 40^\circ$ ), которые должны работать в режиме беспропускного обзора всего ОКП с низких высот. В работе [2], например, предлагается для уменьшения сопротивления воздушного потока остаточной атмосферы изменять положение солнечных батарей КА при их орбитальном движении. В качестве приемников изображения предлагается применять ПЗС–матрицы, работающие в режиме “смотрящего окна” [1]. Эти способы обладают следующими существенными недостатками.

1. При контроле ОКП на больших дальностях, осуществляемом с низких околоземных орбит, угол между оптической осью и направлением движения опасного (т. е. двигающегося к Земле) астероида близок к нулю, что обуславливает значительные погрешности определения параметров движения (ПД) именно опасных астероидов, о падении которых должна предупреждать система. Напротив, будут определяться с лучшей точностью ПД многочисленных астероидов, попадающих в поле зрения телескопа, но проходящих мимо Земли и не представляющих интерес, но являющихся лишним фоном.

2. Для беспропускного обзорного наблюдения всего ОКП необходимо использование значительного количества широкопольных телескопов. Кроме того, при работе ПЗС–матрицы в режиме “смотрящего окна” сверхширокое поле зрения телескопа необходимо для увеличения временной протяженности регистрируемого трека от астероида, лимитирующей возможность определения его параметров движения. Поэтому при диаметре входного зрачка телескопа  $\sim 1,5$  м (определяется требуемой дальностью наблюдения), даже в случае минимально–возможного его фокусного расстояния ( $\sim 3$  м), размер фокальной поверхности и ПИ должен составить не менее 2 м. Проблемой является создание столь протяженных ПЗС–матриц и обеспечение их равномерного охлаждения, требующего значительного энергопотребления в течение длительного (7–10 лет) срока активного функционирования КА. Следует отметить, что с увеличением поля зрения зеркальных телескопов высокой апертуры реальный диаметр конструкций телескопов начинает превышать в несколько раз диаметр входного зрачка. Наконец, при больших полях зрения формируемое телескопом изображение необходимо переносить в плоское поле, что усложняет приемный тракт ОЭА наблюдения.

3. При наблюдении “снизу вверх” далеких астероидов их трудно селективировать на фоне многочисленных звезд. Трек от далекого опасного астероида, попавшего в область поля зрения, будет подобен трекам от звезд, поскольку форма его определяется орбитальным движением КА–наблюдателя.

4. При наблюдении ОКП с орбит ИСЗ существенное отрицательное воздействие на достоверность получаемой информации могут оказать фоновые помехи и ложные тревоги, источником которых является антропогенный фон (“космический мусор” в области высот орбит до 2000 км и ГСО) Земли, что создает дополнительную проблему, которая является особенно значимой для любых систем предупреждения. (Наиболее чувствительны к этому воздействию крупногабаритные

оптические системы, такие как астрономические телескопы [3]. В частности показано, что следы космического мусора, воспринимаемые как ложный объект, будут встречаться в каждом четвертом снимке телескопа Хаббл, функционирующего на высоте 600 км. В зарубежных материалах [4, 5] приводятся доводы о целесообразности вывода подобных телескопов на ГСО). Другим источником ложных тревог могут быть регистрируемые неопасные астероиды, проходящие мимо Земли. Обычный способ выделения опасных астероидов может заключаться в регистрации всех астероидов, попавших в поле зрения телескопов обзорного наблюдения КП, селекции их изображений на фоне звезд, в расчете параметров движения всех зарегистрированных космических объектов и последующем выделении из них опасных астероидов. Эти процедуры требуют высокоточных измерений, быстродействующих вычислительных средств и алгоритмов, использования широкополосных радиолиний передачи информации на Землю.

Предлагаемый способ раннего предупреждения о падении на Землю астероидов и определения их районов падения устраняет все отмеченные недостатки, включая последний из них, так как в его основу положена оптимизация обнаружения и регистрация именно опасных астероидов.

Целью предлагаемого способа является не только устранение недостатков прототипов, но и создание способа, обеспечивающего решение ранее не решаемой задачи предупреждения об астероидной опасности на базе уже освоенных технологий производства средств космической техники, ОЭА наблюдения, что особенно важно в условиях ограничения материальных затрат. Цель предлагается достигать за счет следующих технических средств и решений, используемых в предлагаемом способе.

Гарантированное раннее предупреждение о падении на Землю крупного астероида обеспечивается двумя подсистемами: подсистемой обнаружения опасного, т. е. движущегося к Земле астероида и предварительного определения его ПД для выдачи целеуказания и подсистемы оптического сопровождения обнаруженного опасного астероида и высокоточного определения его ПД.

Первая подсистема содержит 2 КА–обнаружения на орбите обращения Земли вокруг Солнца в точках перед Землей и за ней на большом расстоянии  $\sim 0,1 \text{ а. е.}$ , обеспечивающем возможность наблюдения опасных астероидов при больших углах между оптической осью телескопа и возможными направлениями их движения к Земле. Поле зрения телескопа на каждом из двух КА сканирует с постоянной угловой скоростью некоторую ограниченную область космического пространства — барьерную зону обязательной регистрации любого опасного астероида. Эта контролируемая область КП имеет форму фигуры вращения поля зрения, ориентированного под постоянным углом  $\alpha$  к направлению “КА–Земля”. Сканирование производится за счет закрутки КА вокруг этого направления. Вследствие обязательного прохождения любого опасного астероида через барьерную зону, ее протяженность может быть очень малой по сравнению со всем контролируемым КП. Поэтому поля зрения телескопов и их количество могут быть значительно уменьшены по сравнению с требуемым для обзорного наблюдения всего КП. В частности, 2 КА обнаружения обеспечивают контроль движения астероидов в 99,9% всей небесной сферы. Ввиду своей удаленности от Земли эта зона регистрации опасных астероидов не содержит “космического мусора” и многочисленных мелких метеоритов, дробящихся при их вхождении в атмосферу Земли. Поля зрения телескопов должны быть достаточными для проведения нескольких сеансов наблюдения опасного астероида, образуемых при последовательных циклах вращения поля зрения в течение времени пересечения движущимся к Земле опасным астероидом барьерной зоны (число таких сеансов для определения ПД астероида должно быть не меньше 2). Оно (поле зрения) намного меньше ( $\sim 6^\circ$ ) требуемого для контроля всего КП. Телескопы с такими полями зрения имеют фокальную поверхность, близкую к плоской, размер которой составляет около 0,3 м.

В фокальной плоскости телескопа обнаружения устанавливается прямоугольная ПЗС–линейка. Длина линейки равна диаметру мгновенного поля зрения телескопа в фокальной плоскости; ее ширина определяется размером пиксела, числом шагов накопления заряда, т. е. протяженностью столбцов накопления.

Многочисленные астероиды, проходящие мимо Земли, селекционируются от опасных непосредственно по анализу формы их треков без предварительного трудоемкого определения их параметров движения, а целеуказание на телескоп сопровождения передается только по опасным или возможно опасным астероидам.

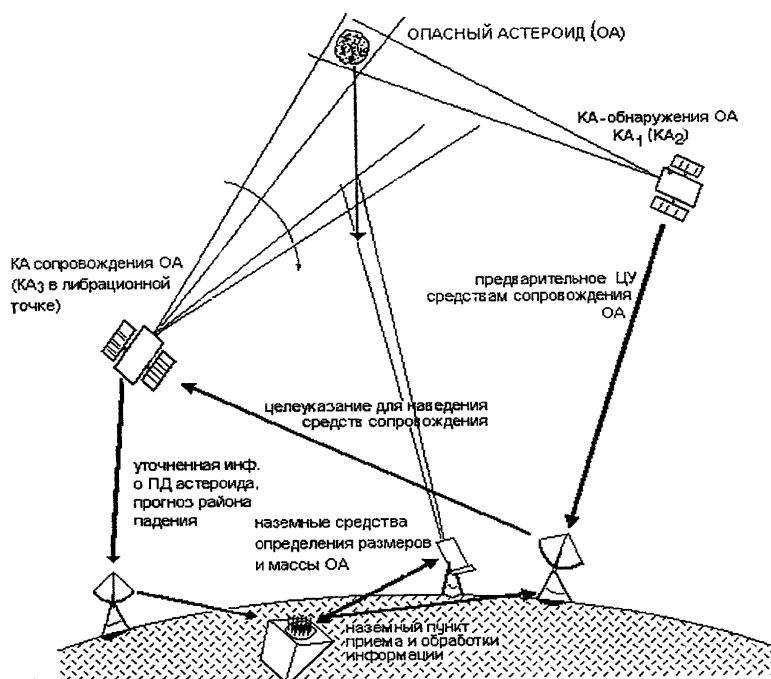
Вторая подсистема предназначена для высокоточного определения параметров движения опасных астероидов (принимаемых за опасные) с целью прогнозирования районов возможного падения астероидов на Землю. Она обеспечивает наведение узкого поля зрения длиннофокусного телескопа на эти астероиды по целеуказанию от первой системы, их захвати последующее сопровождение. Ее принцип работы основные параметры выбраны таким образом, чтобы при функцио-

нировании обеих подсистем использовались достоинства и компенсировались недостатки каждой из них.

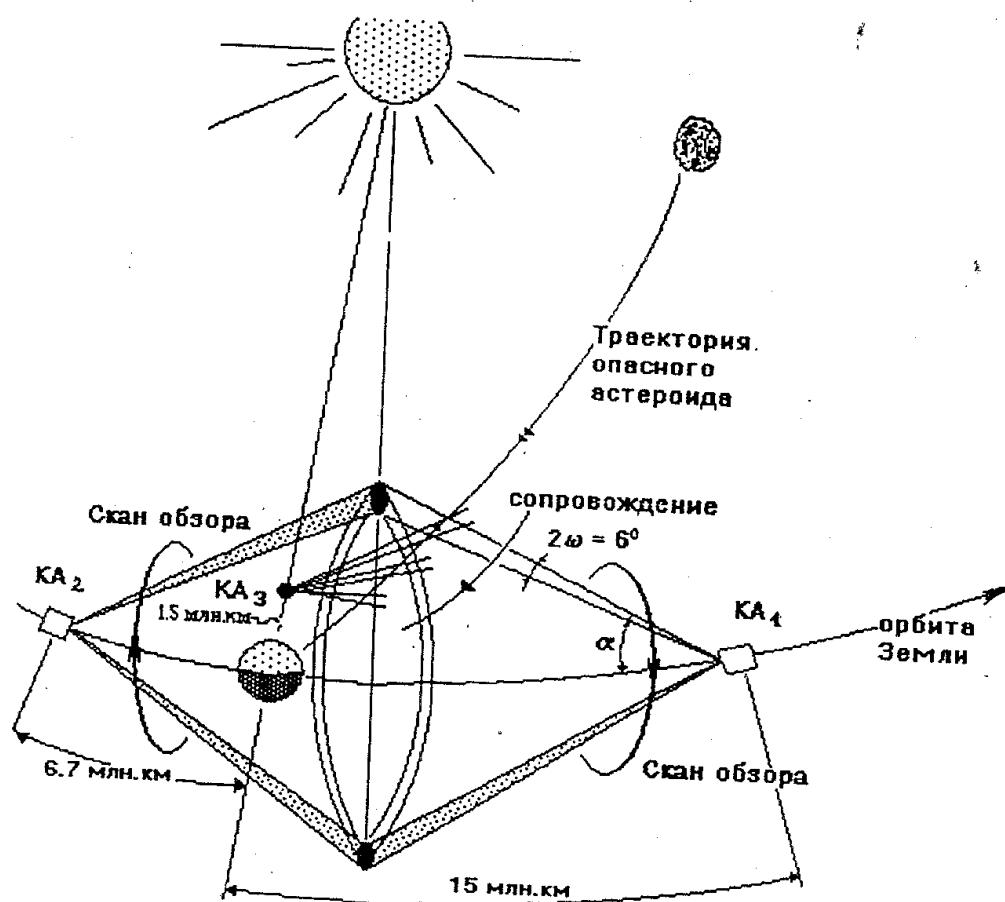
Обеспечение требуемой дальности регистрации астероида достигается за счет увеличения времени экспозиции при прицельном наблюдении. Поэтому становится возможным отказаться от режима ВЗН и использовать ПЗС-матрицу в режиме “смотрящего окна”.

Погрешность определения обеих составляющих координаты изображения астероида в фокальной плоскости телескопа сопровождения определяется малым размером одного элемента матрицы. Погрешность в определении углового положения астероида относительно оптической оси телескопа сопровождения существенно уменьшается за счет большой величины его фокусного расстояния. Уменьшение ошибки определения параметров движения астероидов, принимаемых за опасные, производится за счет обеспечения значительного угла между оптическими осями телескопов обнаружения и сопровождения, а также за счет разнесения на большой угол плоскостей “Земля-астероид-КА обнаружения”, “Земля-астероид-КА сопровождения”. При этом достаточно использовать всего один КА сопровождения, удаленный от Земли на большое расстояние ( $\sim 0,01$  а. е.) в направлении, нормальном к линии “Земля-КА обнаружения”. Он размещается в лагранжевой точке либрации на линии между Землей и Солнцем. Требуемыми параметрами телескопа являются: поле зрения  $\sim 40$  угл. мин., диаметр входного зрачка  $\sim 1,5$  м, фокусное расстояние  $\sim 20$  м, размер ПЗС-матрицы  $\sim 0,2$  м, размер элемента  $\sim 20$  мкм.

### Схема информационного обмена средства предупреждения об астероидной опасности



## Применение технологий космической отрасли для раннего предупреждения об астероидной опасности



### Решаемые задачи

Контроль дальней зоны ОКП с целью выявления угрожающих Земле крупных небесных тел — метеоритов, комет и астероидов.

Состав средств:

- 3 КА на околосолнечных орбитах в плоскости земной орбиты;
- КА<sub>1</sub>, КА<sub>2</sub> на орбите Земли на удалении  $\approx 15$  млн. км от Земли;
- КА<sub>3</sub> в либрационной точке L1 на удалении  $\approx 15$  млн. км от Земли.

Максимальная дальность наблюдения  $\approx 15$  млн. км.

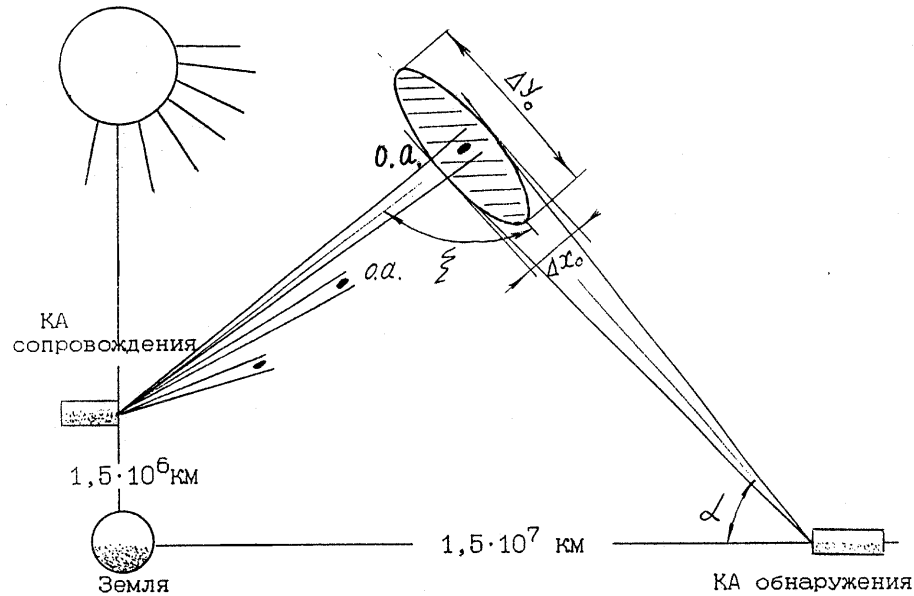
Минимальный размер обнаруживаемого астероида — 50 м.

Время предупреждения  $\approx 2$ –3 суток.

Масса КА наблюдения  $\approx 6$  тонн.

Средство выведения — РН “Протон” с разгонным блоком (ПО “Салют”).

**Взаимное расположение полей зрения телескопов обнаружения и сопровождения при захвате и последующем сопровождении опасного астероида (о. а.) полем зрения длиннофокусного телескопа сопровождения**



$\xi$  — угол между оптическими осями телескопов обнаружения и сопровождения в момент захвата астероида длиннофокусным телескопом;

$\alpha$  — угол между оптической осью телескопа обнаружения и направлением “КА обнаружения — Земля”;

$\Delta y_0, \Delta x_0$  — ошибки определения положения астероида космическими аппаратами обнаружения и сопровождения.

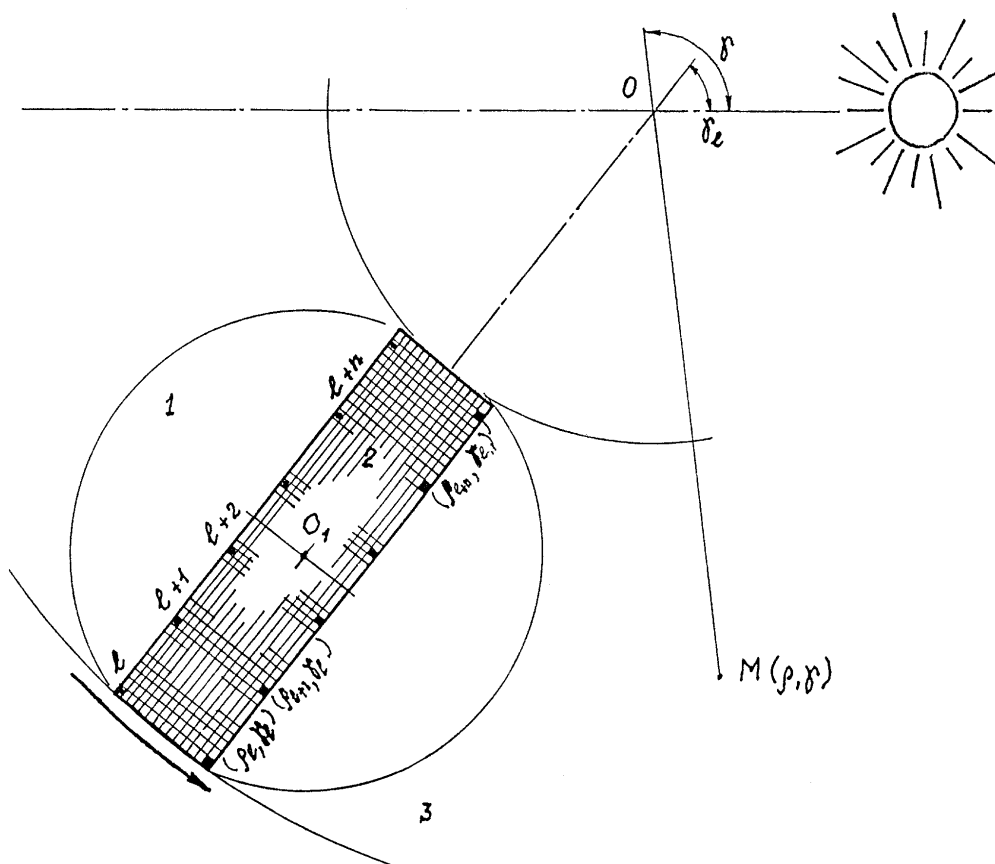
$$\Delta x_0 \sim 2 \cdot 10^4 \text{ км} \quad \Delta y_c, \Delta x_c \sim 100 \text{ км}$$

$$\frac{\Delta x_0}{D} \sim 15 \text{ угл. мин} \quad \frac{\Delta x_c}{D} \sim \frac{\Delta y_c}{D} \sim 2 - 10 \text{ угл. сек}$$

Предусматривается использование телескопов, оптические оси которых образуют значительный угол между собой и с вектором относительной скорости опасного астероида с целью точного определения всех его координат.

Дискретный трек опасного астероида, регистрируемый вращающейся ПЗС-линейкой течение  $(n+1)$ -сканов мгновенного поля зрения (сеансов наблюдения)

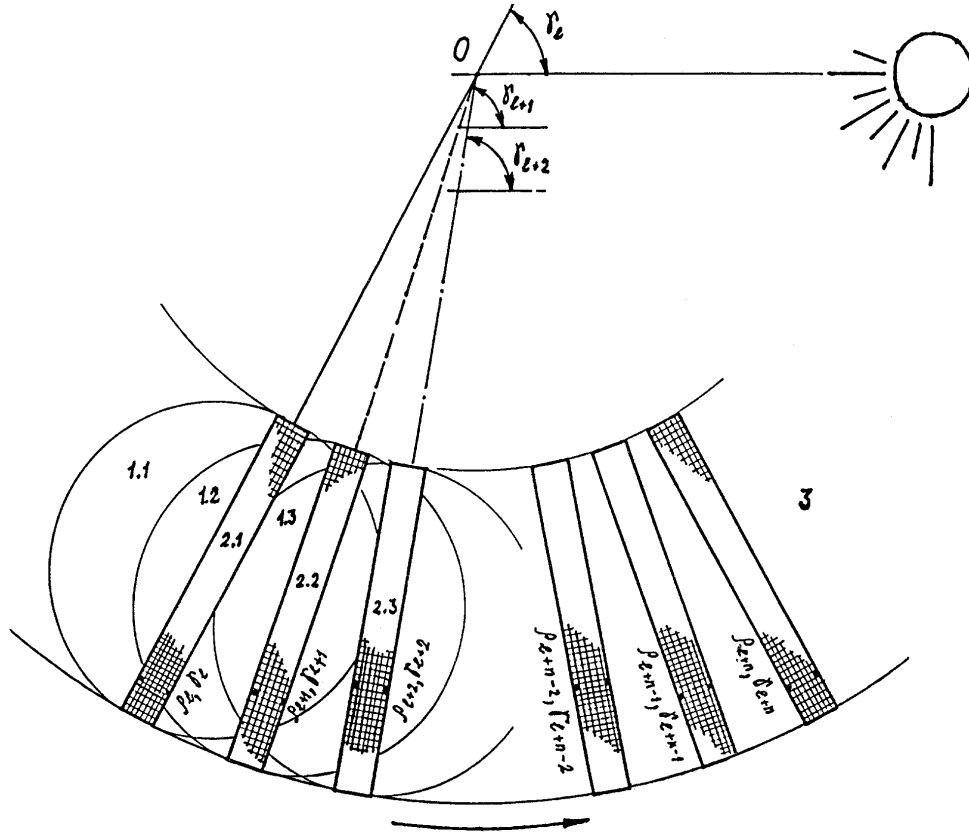
В



1. мгновенное поле зрения телескопа обнаружения в его фокальной плоскости;
  2. ПЗС линейка со строкой вдоль радиуса кольца 2 и столбцами накопления заряда в перпендикулярном направлении;
  3. поле изображений, являющееся геометрическим местом точек фокальной плоскости телескопа при ее вращении вокруг направления на Землю;
- $O$  — центр поля изображения,  
 $O_1$  — проекция оптической оси телескопа на плоскость чертежа,  
 $M$  — произвольная точка поля изображений,  
 $\rho, \gamma$  — ее радиальная и азимутальная координаты;
- — положения изображений опасного астероида в последовательных сеансах наблюдения, обозначенные:  $l, l+1, l+2, \dots, l+n$ ;
  - — элементы считывающей строки ПЗС-линейки, содержащие накопительный заряд.

Радиальные координаты точек трека опасного астероида в моменты  $t_l, t_l + T_{\text{СК}}, \dots, t_l + n \cdot T_{\text{СК}}$  принимают значения  $\rho_l, \rho_{l+1}, \dots, \rho_{l+n}$ , азимутальные — одно значение  $\gamma_l$ .

**Дискретный трек неопасного астероида, регистрируемый вращающейся ПЗС-линейкой в течение (n+1)-сканов мгновенного поля зрения**



1.1, 1.2, 1.3 — положения мгновенных полей зрения в момент захвата ПЗС-линейкой изображения астероида при  $l^{om}$ ,  $l+1^{om}$ ,  $l+2^{om}$  сканах;

2.1, 2.2, 2.3 — положения линейки в эти моменты времени;

3 — поле изображений, формируемое вращающимся телескопом обнаружения;

$\gamma_l, \gamma_{l+1}, \gamma_{l+2}$  — углы ориентации ПЗС-линейки относительно базисного направления “КА обнаружения — Солнце” в моменты  $t_l, t_{l+1}, t_{l+2}$  регистрации в  $l^{om}$ ,  $l+1^{om}$ ,  $l+2^{om}$  сеансах наблюдения изображения неопасного астероида при его входе в барьерную зону;

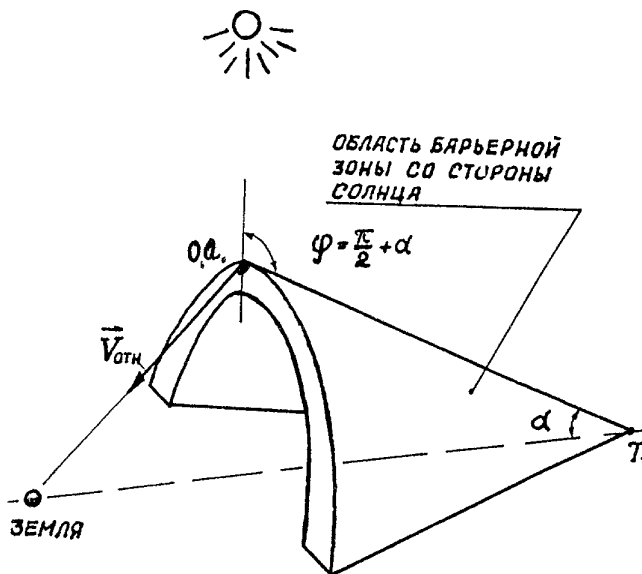
$\gamma_{l+n-2}, \gamma_{l+n-1}, \gamma_{l+n}$  — углы ориентации линейки при регистрации неопасного астероида, выходящего из барьерной зоны.

Радиальные и азимутальные координаты точек трека неопасного астероида в момент  $t_l, t_l + T_{ск}, \dots, t_{l+n} \cdot T_{ск}$  принимают значения  $\rho_l, \gamma_l, \rho_{l+1}, \gamma_{l+1} \dots \rho_{l+n}, \gamma_{l+n}$ .

**Зависимость доли попадающего на входной зрачок телескопа отраженного астероидом солнечного излучения от угла полуразрыва барьерной зоны**

$\alpha, [rad]$	0	$\pi/6$	$\pi/4$
$E_0 \min(\varphi)/E$	0,32	0,11	0,05

Отношение сигнал/шум при регистрации астероидов, двигающихся со стороны Солнца под большими фазовыми углами ( $\varphi: \pi/2$  до  $\pi/2 + \alpha$ ).



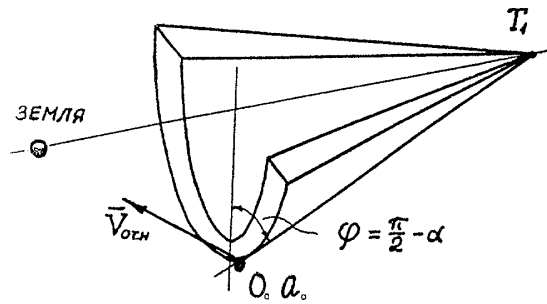
$\frac{D_a, [m]}{D_T, [m]}$	50		100		150	
1,00	0,6–1,7	1,6–6,4	2,3–6,5	6,218	5,0–14	14–37
1,50	0,9–2,7	2,6–7,4	3,7–11	10–28	8,2–23	22–57
2,00	1,3–3,8	3,6–10	5,2–15	14–38	11–31	30–75
	$L=10^7 км$	$L=6 \cdot 10^6 км$	$L=10^7 км$	$L=6 \cdot 10^6 км$	$L=10^7 км$	$L=6 \cdot 10^6 км$
$\alpha = \frac{\pi}{6}, \quad \frac{\pi}{2} \leq \varphi < \frac{2\pi}{3}, \quad n_{шн} = 800, \quad \rho_a = 0,15$						

Телескоп с диаметром входного зрачка 1,5 м позволяет регистрировать астероиды крупнее 100 м с вероятностью лучше 0,95.



**Отношение сигнал/шум при регистрации астероидов, двигающихся со стороны, тивоположной Солнцу, под фазовыми углами от  $\pi/2 - \alpha$  от  $\pi/2$**

про-

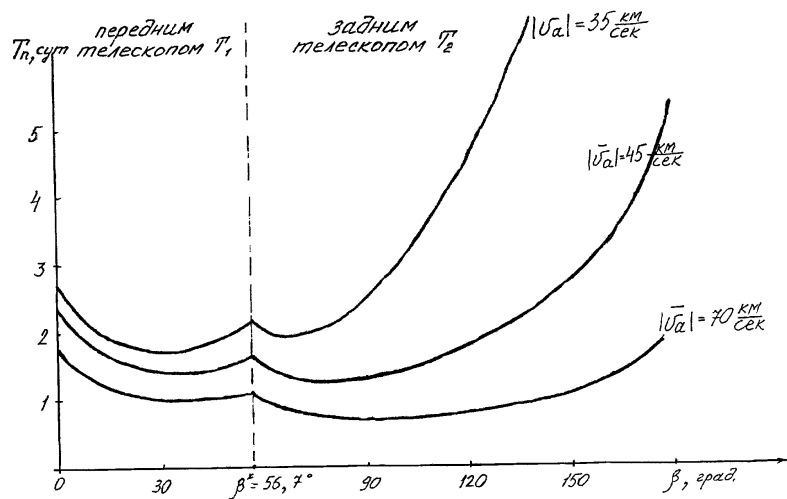


$\frac{D_a, [м]}{D_T, [м]}$	50		100		150	
1,00	1,7–3,2	4,6–9	6,5–12	18–32	14–27	37–66
1,50	2,7–5,2	7,4–14	11–20	28–50	23–41	57–97
2,00	3,8–7,2	10–19	15–27	38–66	31–56	75–123
	$L=10^7 \text{ км}$	$L=6 \cdot 10^6 \text{ км}$	$L=10^7 \text{ км}$	$L=6 \cdot 10^6 \text{ км}$	$L=10^7 \text{ км}$	$L=6 \cdot 10^6 \text{ км}$
$\alpha = \frac{\pi}{6}, \quad \frac{\pi}{3} \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}, \quad n_{\text{шн}} = 800, \quad \rho_a = 0,15$						

Телескоп с диаметром входного зрачка 1,5 м позволяет регистрировать астероиды крупнее 50 м с вероятностью лучше 0,95.

**Времена подлета к Земле опасного астероида (о. а.) барьерной зоны его регистрации**

от



о.а. движется навстречу Земле  $a=1,5 \cdot 10^7 \text{ км}, b=6,7 \cdot 10^6 \text{ км}, m \alpha = \pi/6$  о. а. догоняет Землю

При раннем предупреждении о падении на Землю астероида и последующем оповещении о параметрах движения, размере, массе и районе падения используются средствами коммуникации, создаваемые в рамках международного сотрудничества, в том числе, международной программы астрофизических исследований “Спектр”.

## **Литература**

1. Колелла Н., Лидебьюр А. “Охраняющий Землю” спутник. РЖ 62, №3, 1993, 407 с..
2. Вуд Л., Хайд Р. и др. Доклад на конференции “Проблемы защиты Земли от столкновений с околоземными космическими объектами”, 26–30 сент. 1994г., Челябинск–70.
3. Емельянов В.А., Лукьященко В.И., Черяпкин И.А., “Основные задачи и проблемы наблюдения засорения околоземного космического пространства”, и др., I научная школа–семинар “Электронные–системы экологического мониторинга”, Моск. обл., г. Новогорск, 23–26 марта 1993 г..
4. AIAA Paper № 90–1353. ST–ESF NEWS Letter, 1990, № 12.