

УДК 52.08

## Возможности использования криогенных оптико-электронных систем для обнаружения астероидов

*Д-р техн. наук С. И. Ханков*

*leva0007@rambler.ru*

*Университет ИТМО*

*197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49*

**Проведены сопоставительные исследования дальности обнаружения астероидов в видимом и инфракрасном диапазонах в зависимости от температуры астероида, которая вычислялась для условий движения в направлении к Солнцу. Вычислены зависимости от времени движения астероида его температура и дальность обнаружения. Показано, что астероиды размером 10–50 м могут быть обнаружены на дистанциях, не менее одной астрономической единицы от орбиты Земли. Наилучшие условия обнаружения могут реализовываться при размещении криогенной оптико-электронной системы с диаметром входного зрачка 10 м и с неселективным приемником излучения во второй точке Лагранжа, где может быть обеспечена его термостабилизация с минимальными затратами энергии.**

**Ключевые слова:** астероид, криогенная оптико-электронная система, инфракрасное излучение, дистанция обнаружения.

### Possibilities of employing cryogenic optoelectronic systems for detection of asteroids

*D. Sc. S. I. KHANKOV*

*leva0007@rambler.ru*

*University ITMO,*

*197101, St. Petersburg, Kronverksky Ave., 49*

**To identify the distances at which asteroids may be detected in the visible and infrared ranges a comparative research has been conducted with reference to the temperature of an asteroid calculated for the conditions of their movement towards the sun. Correlations between asteroid traveling time, its temperature and detection distance have been found. It is shown that asteroids with the size of 10–50 m can be discovered at a distance of no less than one astronomical unit from the Earth's orbit. The best conditions for detection are attained when a cryogenic optoelectronic system with the entrance pupil diameter of 10 m and a non-selective radiation detector is placed at the second Lagrange point where its thermal stability may be secured with minimum power expenses.**

**Keywords:** asteroid, cryogenic optoelectronic system, infrared radiation, detection distance.

В настоящее время актуальной является задача противодействия астероидной угрозе [1]. Для своевременного обнаружения астероидов, которые перемещаются с большими скоростями, необходимо регистрировать объект на дистанциях, обеспечивающих возможность принятия решений по мерам противодействия. Решающим фактором является время, остающееся до пересечения астероидом орбиты Земли.

В данной работе проведена оценка предельных дальностей обнаружения при использовании криогенных оптико-электронных систем (ОЭС), работающих в спектральных диапазонах, соответствующих собственному тепловому излучению астероида — в инфракрасной (ИК) области спектра, и произведено сопоставление с предельными возможностями обнаружения астероида в спектре отраженного им солнечного излучения. Целью исследований также являлась оценка времени, остающегося до пересечения обнаруженным астероидом орбиты Земли.

До обнаружения астероида конфигурация его неизвестна, неизвестен также его размер, материал и радиационные свойства поверхности. Поэтому целесообразно моделировать ситуацию для астероида сферической формы, что не принципиально для решения поставленной задачи, но существенно упрощает расчеты. Следует отметить, что в книге [2] показано, что тепловой режим космического объекта выпуклой конфигурации при его вращении вокруг любой из осей хорошо описывается при замене его конфигурации сферической. Для существенного упрощения расчетов примем допущение об изотермичности астероида, пренебрегая возможными температурными неравномерностями по его поверхности и объему. В пользу такого допущения можно указать на относительно малые значения критериев Био для астероидов, отдающих тепловую энергию в космическое пространство излучением.

В спектре солнечного излучения, который будем называть коротковолновым (КВ) диапазоне могут обнаруживаться объекты с достаточным коэффициентом отражения или альбедо его поверхности. В спектре собственного теплового излучения или длинноволновом инфракрасном (ИК) диапазоне наиболее эффективно могут регистрироваться объекты с достаточно высокой температурой и высоким значением степени черноты. Актуально сравнение возможностей своевременного обнаружения астероида в двух указанных диапазонах электромагнитного излучения.

Предельная дистанция обнаружения астероида  $L$ , независимо от спектрального состава его излучения, определяется из соотношения [3]

$$L = D \sqrt{\frac{\pi S_m B}{4 P}}, \quad (1)$$

где  $D$  — диаметр входного зрачка ОЭС;  $S_m$  — площадь миделя КО со стороны наблюдения;  $B$  — яркость КО;  $P$  — пороговая чувствительность фотоприемника или мощность потока излучения, регистрируемая чувствительным элементом приемника.

Важнейшими характеристиками дистанционно регистрируемого астероида являются: его определяющие размеры, характеризуемые величиной  $S_m$ , и его яркость  $B$ , которая существенно различается для КВ и ИК диапазонов.

Яркость отраженного поверхностью астероида светового потока солнечного излучения может быть описана формулой

$$B_1 = \frac{1}{\pi} AE; \quad E = E_s \left( \frac{L_s}{L} \right)^2, \quad (2)$$

где  $A$  — полусферическая отражательная способность или Альbedo астероида;  $E$  — мощность потока солнечного излучения, падающего на поверхность астероида;  $E_s$  — солнечная постоянная, равная удельной мощности излучения Солнца на орбите Земли;  $L$  — расстояние от астероида до Солнца;  $L_s$  — расстояние от Солнца до Земли.

В спектре собственного теплового излучения яркость астероида определяется его температурой и описывается формулой

$$B = \varepsilon \frac{\delta}{\pi} \sigma_0 \theta^4; \quad \theta = \frac{T}{100}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon$  — степень черноты поверхности астероида;  $\delta$  — доля энергии, заключенной в рабочем спектральном диапазоне от общей энергии излучения;  $\sigma_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  — приведенная постоянная Стефана-Больцмана;  $T$  — температура астероида.

В рамках принятой модели процесса (астероид движется в направлении к Солнцу из глубины космоса по прямой линии) отсчет процесса начинаем от прохождения астероида в окрестностях орбиты Плутона, что соответствует удалению от Солнца  $a = L/L_s = 40$  а. е. (астрономических единиц).

В рассмотренном случае при допущении о постоянстве скорости движения астероида удаление от Солнца сокращается во времени по закону

$$L = L_0 - V\tau, \quad (4)$$

где  $L_0$  — начальное расстояние между астероидом и Солнцем;  $V$  — скорость движения КО;  $\tau$  — текущее время.

Подставив (4) в выражение для  $E$  из выражения (2), получим

$$E = E_s \left( \frac{L_s}{L_0 - V\tau} \right)^2 = E_s \cdot f(\tau); \quad f(\tau) = \left( a - \frac{\tau}{t} \right)^{-2}; \quad t = \frac{L_s}{V}. \quad (5)$$

Подставив выражение (5) в формулу для яркости (2) и далее в (1), получим для КВ диапазона выражение для предельной дальности обнаружения

$$L_l = Dr \sqrt{\frac{\pi}{4P} AE_s \cdot F(\tau)}; \quad F(\tau) = \sqrt{f(\tau)}, \quad (6)$$

где  $r$  — радиус сферического астероида.

Переходя к оценкам для ИК диапазона, ограничимся рассмотрением случая абсолютно черной поверхности астероида и интегральным диапазоном теплового излучения, то есть, считаем приемник излучения неселективным, принимающим все тепловое излучение астероида. В этом случае  $\varepsilon = 1$  и  $\delta = 1$ . Тогда, подставив выражение (3) в формулу (1), можно получить

$$L_h = Dr \sqrt{\frac{\pi}{4P} \sigma_0 \cdot \theta^2}. \quad (7)$$

Сопоставление предельных дальностей обнаружения при использовании КВ и ИК диапазонов при допущении о равенстве пороговых мощностей потоков в (6) и (7) можно провести, используя отношение

$$n = \frac{L_l}{L_h} = \sqrt{\frac{AE_s}{\sigma_0 \theta^4}} \cdot F(\tau). \quad (8)$$

Приняв скорость движения астероида  $V = 50 \text{ км}/\text{с}$ , с учетом выражения (5), получим  $t = 3 \cdot 10^6 \text{ с} \approx 35$  сут. Примем также предельное время движения астероида до пересечения с орбитой Земли  $\tau = 35 \cdot 39 = 1365$  сут (где 39 а. е. — расстояние от орбиты Плутона до орбиты Земли). В результате получим выражение для функции  $F(\tau)$  в виде

$$F(\tau) = \left( 40 - \frac{\tau}{35} \right)^{-1}; \quad 0 \leq \tau \leq 1365 \text{ сут}. \quad (9)$$

Расчеты проведем для предельного случая  $A = 1$ . Тем самым сопоставляются предельные возможности для оптимальных условий наблюдения в КВ и ИК диапазонах. Принимая известное значение  $E = 1366 \text{ Вт}/\text{м}^2$  [4], получим вместо (8)

$$n = \frac{15,52}{\theta^2 \left( 40 - \frac{\tau}{35} \right)}. \quad (10)$$

В соотношении (10) содержится неопределенность по величине  $\theta$ . Зависимости  $n(T)$ , вычисленные по формуле (10), для  $\tau = 0$  и  $\tau = 1365$  показаны на рис. 1. Из графика видно, что только при  $T > 50 \text{ К}$  в начале пути (на максимальных дистанциях) использование ИК диапазона может дать выигрыш по дальности обнаружения. Однако для получения достоверной информации об эффективности использования двух каналов (КВ и ИК) необходимо, во-первых, определить реальные дальности обнаружения, а во-вторых, вычислить реальную температуру астероида при его движении по принятой траектории.

Примем значения  $D = 1 \text{ м}$ ,  $r = 50 \text{ м}$ ,  $P = 10^{-18} \text{ Вт}$ . В результате из (6) получим формулу для расчета дистанции  $L_l$  в км

$$L_l = 1,64 \cdot 10^{10} \left( 40 - \frac{\tau}{35} \right)^{-1}. \quad (11)$$

В начале движения астероида при  $\tau = 0$  дистанция обнаружения составляет  $410 \cdot 10^6 \text{ км}$ , что составляет примерно 2,7 а. е. Эта дистанция меньше чем начальное расстояние до Земли, поэтому с орбиты Земли астероид бу-

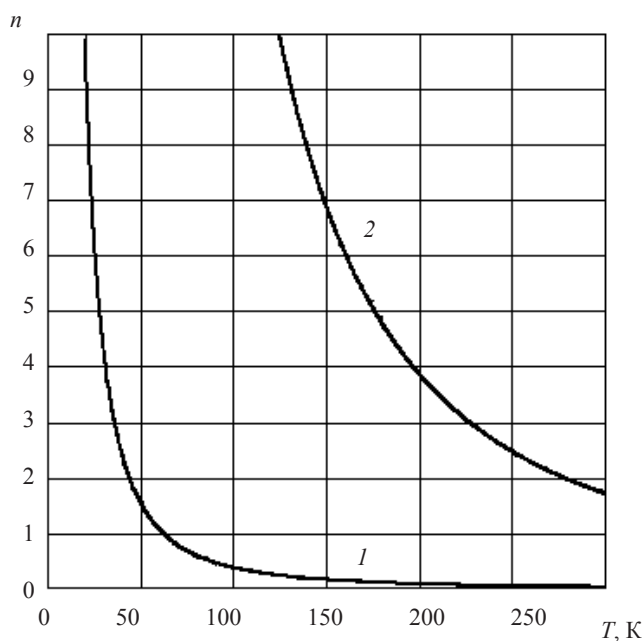


Рис. 1. Зависимость отношения дальностей обнаружения астероида в спектре отраженного солнечного и собственного теплового излучения от его температуры: 1 — в начале вхождения астероида в солнечную систему; 2 — к моменту пересечения орбиты Земли

дет незаметен. В конце пути астероида (при пересечении орбиты Земли) его яркость возрастает столь значительно, что дистанция обнаружения составляет  $1,64 \cdot 10^{10}$  км, но это уже не актуально.

Практический интерес представляет определение фактической дистанции обнаружения с орбиты Земли. Момент времени, соответствующий началу обнаружения в КВ диапазоне может быть определен из уравнения

$$E_s \left( 39 - \frac{\tau}{35} \right) = 1,64 \cdot 10^{10} \left( 40 - \frac{\tau}{35} \right)^{-1}. \quad (12)$$

Из решения уравнения (12) получено:  $\tau = 220,5$  сут. Общее время движения КО от орбиты Плутона до орбиты Земли определяется из соотношения

$$\tau_p = 39 t = 1365 \text{ сут} \approx 3 \text{ года и } 9 \text{ мес.} \quad (13)$$

При этом время до встречи астероида с Землей равно  $\tau_0 = 1365 - 220,5 = 1144,5$  сут (или более трех лет).

Примем для ИК диапазона то же пороговое значение мощности регистрируемого излучения  $P = 10^{-18}$  Вт. Тогда, подставив (3) в (1), получим с учетом значений всех параметров дальность обнаружения в км

$$L_n = 2,11 \cdot 10^6 \cdot D r \theta^2. \quad (14)$$

Подставив в (14) те же значения  $D = 1$  м,  $r = 50$  м, получим

$$L_n = 10,55 \cdot 10^7 \cdot \theta^2. \quad (15)$$

Из (15) следует, что дальность обнаружения в ИК диапазоне зависит от квадрата температуры астероида. Большинство известных астероидов движется по замкнутым траекториям внутри солнечной системы, и их температуры достаточно высоки. Целесообразно промоделировать гипотетическую ситуацию, когда астероид входит в пределы солнечной системы из дальнего космоса и движется прямолинейно по направлению к Солнцу.

При таком сценарии астероид имеет низкую температуру и минимальную заметность в ИК области спектра. Выбранная физическая модель процесса реализует наихудшие условия для обнаружения астероида. При движении астероида от периферии Солнечной системы к Солнцу его температура должна возрастать вследствие поглощения все возрастающей мощности солнечного излучения.

Уравнение нестационарного теплообмена астероида имеет вид

$$C_s \frac{dT}{d\tau} + \varepsilon \sigma_0 \theta^4 = (1 - A) E \Phi + \varepsilon \sigma_0 \theta_0^4; \quad (16)$$

$$C_s = \frac{C}{S}; \quad \Phi = \frac{S_m}{S}; \quad \theta_0 = \frac{T_0}{100}.$$

где  $C_s$  — поверхностная плотность полной теплоемкости астероида;  $C$  — полная теплоемкость астероида;  $S$  — полная площадь поверхности астероида;  $\Phi$  — отношение площади мишени к полной площади поверхности, равно для сферического астероида  $\Phi = 0,25$ ;  $T_0 = 4$  К — температура холодного космоса.

С учетом соотношения (5) для астероида с абсолютной черной поверхностью ( $\varepsilon = 1$  и  $A = 0$ ) уравнение (16) можно представить в виде

$$\frac{dT}{d\tau} + \frac{\sigma_0}{C_s} \theta^4 = \frac{E_s f(\tau)}{4 C_{sm} \varphi(\theta)} + \frac{\sigma_0}{C_{sm} \varphi(\theta)} \theta_0^4. \quad (17)$$

Входящая в уравнение (17) функция  $\varphi(\theta)$  описывает зависимость от температуры удельной теплоемкости, а значение  $C_{sm}$  соответствует значению температуры  $T_m = 300$  К. Полная теплоемкость сферического астероида, а также поверхностная плотность полной теплоемкости определяются по формулам

$$C = c_0 \varphi(\theta) U = c_0 \varphi(\theta) \frac{4}{3} \pi r^3; \quad C_s = c_0 \varphi(\theta) \frac{r}{3}, \quad (18)$$

где  $c_0$  — объемная теплоемкость материала астероида при  $T_m = 300$  К;  $U$  — объем астероида.

Примем значение объемной теплоемкости  $c_0 = 3,54 \cdot 10^6$  Дж/(м<sup>3</sup>·К) [5], что соответствует железу (для всех металлов значение  $c_0$  отличается незначительно). Тогда получим  $C_s = 6 \cdot 10^7$  Дж/(м<sup>2</sup>·К). Функция температурной зависимости теплоемкости  $\varphi(\theta)$  задавалась полиномом вида

$$\varphi(\theta) = b_0 + b_1 \theta + b_2 \theta^2 + b_3 \theta^3 + b_4 \theta^4 \quad (19)$$

Принимая в расчетах свойства железа, с погрешностью менее 1% для диапазона  $0,04 \leq \theta \leq 0,4$  и с погрешностью  $\sim 3\%$  температурная функция описывается формулой (19) при значениях коэффициентов, представленных в табл. 1.

С учетом принятого значения теплоемкости  $C_{sm}$ , функции  $\varphi(\theta)$  вида (19) с коэффициентами полинома из табл. 1 и при изменении мощности падающего солнечного излучения по закону, описываемому выражением (5), уравнение (17) можно представить в следующем, удобном для расчетов, виде

$$\frac{dT}{d\tau} + 0,817 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{\theta^4}{\varphi(\theta)} = \frac{49,21 \cdot 10^{-4}}{\varphi(\theta) \left( 40 - \frac{\tau}{35} \right)^2} + \frac{0,21 \cdot 10^{-12}}{\varphi(\theta)}. \quad (20)$$

Коэффициенты в уравнении (19) переведены из системы СИ так, что время вычисляется в сутках и соответству-

Таблица 1

Значения коэффициентов аппроксимационного полинома

Диапазон изменения $\theta$	Значения коэффициентов				
	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$
$0,04 \leq \theta \leq 0,4$	$0,10978 \cdot 10^{-4}$	$0,48891 \cdot 10^{-2}$	0,018542	0,068349	0,35518
$0,4 < \theta \leq 3$	-0,14385	0,74037	-1,1469	0,856	-0,1712

ют радиусу астероида  $r = 50$  м. Для пересчетов на другое значение радиуса необходимо умножить все значения коэффициентов на 50 и разделить на выбранное значение  $r$ .

Известно, что реальную угрозу с катастрофическими для Земли последствиями несут астероиды с поперечным диаметром свыше 150 м. Однако будем оценивать реализуемые дальности обнаружения для астероидов с радиусом 50 и 10 м, для которых дальности обнаружения будут ниже.

На рис. 2 показаны зависимости температур астероидов радиусом 50 м и 10 м от времени движения от орбиты Плутона до орбиты Земли, вычисленные из решения уравнения (20). В расчетах принималась начальная температура  $T_0 = 4$  К, что соответствует температуре холодного космоса, откуда прибыл астероид, а также  $T_0 = 44$  К, что соответствует стационарному значению температуры астероида, находящегося на удалении 40 а. е. от Солнца. Из рис. 2 следует, что астероид радиусом 50 м в течение значительной части пути (до 500 сут) мало меняет начальную температуру 44 К, а при начальной температуре 4 К быстро нагревается по мере приближения к Солнцу. Это связано с весьма малой объемной и полной теплоемкостью при температурах ниже 40 К. По мере роста температуры растет теплоемкость астероида, что замедляет его нагрев. Однако на следующем участке траектории увеличение радиационного потока солнечного излучения приводит к ускорению роста температуры астероида. Астероид радиусом 10 м начинает нагреваться Солнцем практически с самого начала движения, что обусловлено малым значением теплоемкости  $C_{sm}$ , которое в 125 раз меньше, чем у астероида с радиусом 50 м.

Представленные на рис. 3 зависимости дальности обнаружения астероида с помощью ОЭС с диаметром входного зрачка 1 м указывают на большие проблемы с приемлемым запасом времени для противодействия обнаруженному астероиду. Необходимо отметить, что данные рис. 2 и 3 не вполне коррелируют между собой. Ход кривых на рис. 2 очевиден: астероиды с меньшей массой греются быстрее. При этом начальная температура астероида влияет на уровень его температуры в течение первой половины времени движения от орбиты Плутона до орбиты Земли. Из рис. 3 следует, что астероид с радиусом 50 м может быть обнаружен на больших дистанциях, чем при радиусе 10 м. В этом случае размер астероида влияет на дальность обнаружения сильнее, чем его температура.

Для определения реальных дистанций обнаружения необходимо сопоставить предельную дальность обнаружения с дальностью до астероида в данный момент времени. На рис. 4 показаны зависимости предельных дальностей обнаружения астероида (фрагмент рис. 3) и зависимость реального расстояния от орбиты Земли до астероида, которая вычислялась по формуле

$$L = 150 \cdot 10^6 \left( 40 - \frac{\tau}{35} \right). \quad (21)$$

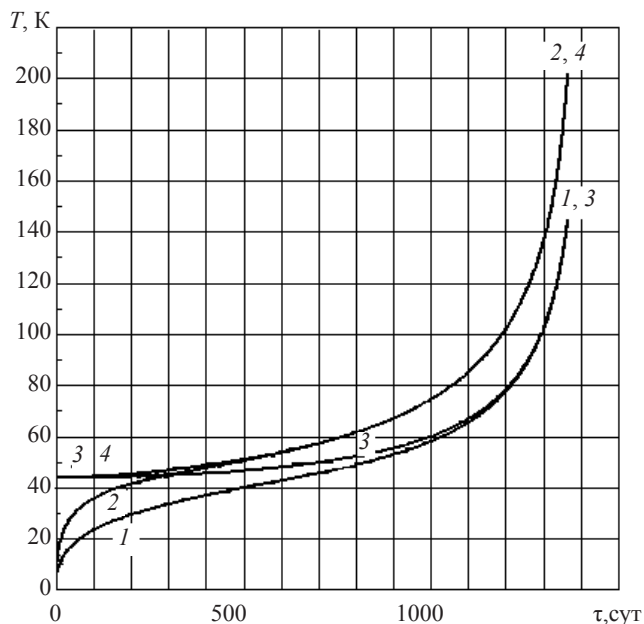


Рис. 2. Зависимости температуры астероида от времени движения к Солнцу: 1, 2 — соответствуют начальной температуре астероида 4 К; 3, 4 — начальной температуре астероида 44 К; 1, 3 — относятся к астероиду радиусом 50 м; 2, 4 — к радиусу астероида 10 м

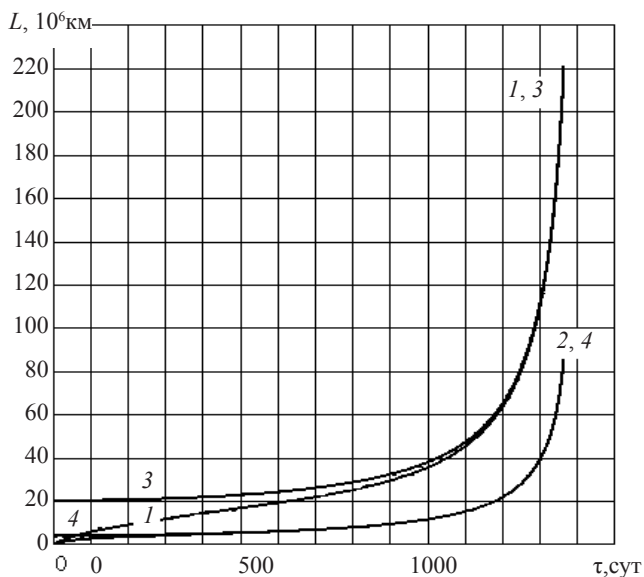


Рис. 3. Зависимости от времени движения астероида к Солнцу дальностей обнаружения оптико-электронной системой с диаметром входного зрачка 1 м. (Нумерация кривых соответствует рис. 2)

Все, реально возможные, дальности обнаружения лежат ниже линии 5 (см. рис. 4). Например, для астероида с радиусом 50 м реально достижимая дальность обнаружения примерно равна 140 млн км, что соответствует 1330-м суткам от начала отсчета, когда до пересечения

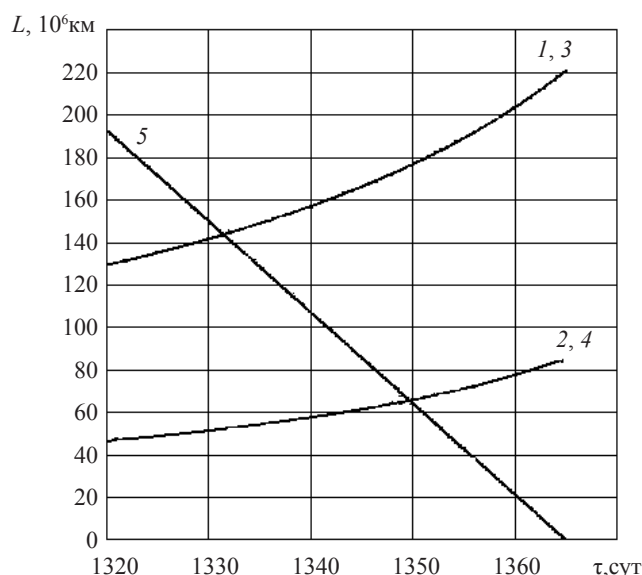


Рис. 4. Зависимости от времени движения астероида к Солнцу дальностей обнаружения оптико-электронной системой с диаметром входного зрачка 1 м.

(Нумерация кривых соответствует рисунку 2);

5 — зависимость расстояния между астероидом и орбитой Земли от времени

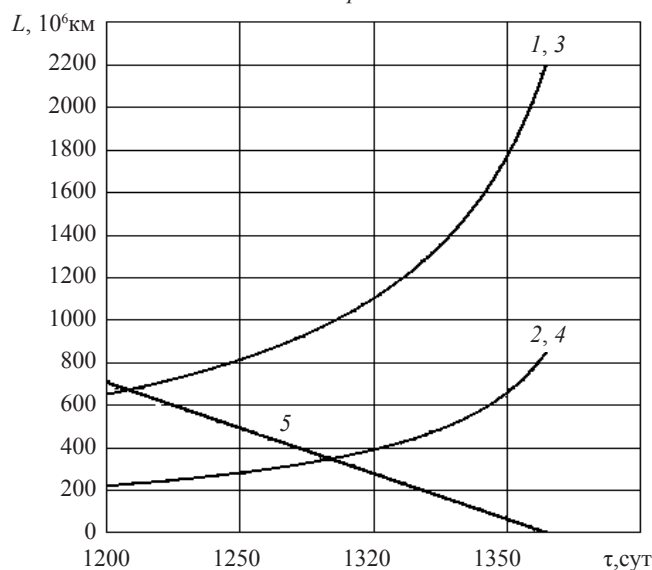


Рис. 5. Зависимости от времени движения астероида к Солнцу дальностей обнаружения оптико-электронной системой с диаметром входного зрачка 10 м.

(Нумерация кривых соответствует рис. 4)

орбиты Земли остается 35 сут. При этом до встречи с астероидом с радиусом 10 м остается 15 сут.

Единственным способом увеличения дальности обнаружения является использование ОЭС с увеличенным диаметром входного зрачка. На рис. 5 показаны зависимости для случая использования ОЭС с  $D = 10$  м. Можно сделать вывод о возможности обнаружения астероидов диаметром 100 м на расстоянии 4 а. е. и диаметром 20 м — свыше 3 а. е. В первом случае до встречи с орбитой Земли остается 165 сут, а во втором — 80 сут. При этом температура астероида, в указанном диапазоне изменения его радиуса, в любом случае превышает 60 К, что по данным рис. 1 позволяет ожидать преимущество ИК диапазона над КВ диапазоном по дальности обнаружения. Однако оценка по формуле (10) показывает, что при  $\theta \leq 1$  ИК диапазон имеет преимущес-

тво до  $\tau \leq 857$  сут. В рассмотренных ситуациях это условие не реализуется, поэтому сопоставление каналов по эффективности необходимо проводить по изложенной здесь методике. В данном случае уместнее использовать термин «эффективность», поскольку дальность обнаружения для обоих каналов зависит от времени от начала движения астероида, от его расстояния до орбиты Земли. А для ИК канала этот параметр зависит еще и от температуры астероида, определяемой его массой и, соответственно, полной теплоемкостью, зависящей от температуры, которая, в свою очередь, зависит от расстояния до Солнца.

В результате проведенных исследований можно сделать основной вывод о целесообразности использования для обнаружения и сопровождения астероидов общего неселективного радиометра, объединяющего КВ и ИК диапазоны, на основе оптической системы типа Кесслера с большой апертурой и с низкими температурами приемной оптики (менее 30 К). Наиболее эффективным по дальности обнаружения астероидов криогенным телескопом с минимальными затратами могло бы быть размещение такой криогенной и неселективной ОЭС во второй точке Лагранжа в тени Земли.

### Список литературы

1. Железнов Н. Б. Астероидно-кометная опасность: современное состояние проблемы. <http://www.astronet.ru/db/msg/1202522/index.html>
2. Моделирование тепловых режимов космического аппарата и окружающей его среды. Под ред. Г. И. Петрова. — М.: Машиностроение, 1971. 382 с.
3. Каменев А. А., Лаповок Е. В., Ханков С. И. Аналитические методы расчета тепловых режимов и характеристик собственного теплового излучения объектов в околоземном космическом пространстве. — СПб. 2006. — 186 с.
4. Trenberth K. E., Fasullo J. T., and Keihl J. Earth's global energy budget // *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2009, Vol. 90, No 3, pp. 311–323
5. Справочник по физико-техническим основам криогеники/под ред. М. П. Малкова. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 439 с.

### References

1. Zheleznov N. B. Asteroidno-kometnaja opasnost': sovremennoe sostojanie problemy. <http://www.astronet.ru/db/msg/1202522/index.html>
2. Modelirovanie teplovyh rezhimov kosmicheskogo apparata i okruzhajushhej ego sredy. Pod red. G. I. Petrova. — М.: Mashinostroenie, 1971. 382 s.
3. Kamenev A. A., Lapovok E. V., Hankov S. I. Analiticheskie metody rascheta teplovyh rezhimov i karakteristik sobstvennogo teplovogo izlucheniya ob#ektov v okolozemnom kosmicheskom prostranstve. — SPb. 2006. 186 s.
4. Trenberth K. E., Fasullo J. T., and Keihl J. Earth's global energy budget. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2009, Vol. 90, No 3, pp. 311–323.
5. Spravochnik po fiziko-tehnicheskim osnovam kriogeniki/pod red. M. P. Malkova. — М.: Jenergoatomizdat, 1985. — 439 s.