

УДК 520.6.07/004.02/629.78

РАЦИОНАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛЕСКОПОВ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ О ПАДЕНИИ НА ЗЕМЛЮ МАЛЫХ АСТЕРОИДОВ

Емельянов В. А., Ёлкин К. С., Бодрова Ю. С., Меркушев Ю. К.

RATIONAL OPERATION MODES OF SPACE TELESCOPES TO PROVIDE EARLY WARNING OF COLLISION OF SMALL ASTEROIDS WITH EARTH

Emelyanov V. A., Elkin K. S., Bodrova Y. S., Merkushev Yu. K.

Central Research Institute of Machine Building (TsNIIMash), Korolev, Moscow Oblast, 141070, Russia
e-mail: vaem45@tsniimash.ru

Abstract. The problem of asteroid and comet hazard defence is relevant and has an international value. It is necessary to ensure the detection of hazardous celestial bodies (HCBs) traveling to the Earth along collisional trajectories. To solve this problem, it is imperative to determine the areas of application of means of HCB detection. The use of space telescopes should be carried out to detect HCBs that cannot be detected by ground-based telescopes due to various limitations in the form of solar elongation angles or HCB orbit and serve to improve the time of warning of the fall of HCB to the Earth and provide refinement of its motion parameters.

In order to determine the fact of detection and the times of HCB visibility of ground-based telescopes or space telescopes, simulation modeling of the HCB motion for various collision orbits and of the retargeting of telescopes fields of vision simulation modeling was used.

The types of orbits of colliding with the Earth asteroids that require the use of space telescopes operating in the mode of survey-search observation of a limited area of the celestial sphere inside the Earth's orbit were determined. Types of orbits that require the use of STs operating in a less complicated mode of escorting asteroids whose approximate orbital parameters were previously determined by ground-based telescopes until the moment of their meeting with the Earth were defined.

The directions of international cooperation and interaction in solving problems of operational warning about the fall of HCBs to the Earth are outlined.

Keywords: ground-based telescope, space telescope, solar elongation angle, simulation modeling, perihelion and aphelion of the orbit, hazardous celestial body.

Актуальная задача предотвращения астероидно-кометной опасности является международной. Для её решения исторически использовались наземные телескопы (НТ), но существуют опасные небесные тела (ОНТ), орбиты движения которых существенно затрудняют как своевременное обнаружение, так и отслеживание, и определение их параметров движения, что во многом является следствием ограничений на угол солнечной элонгации [1]. Применение космических телескопов (КТ) должно проводиться для обнаружения ОНТ, которые не обнаруживаются

наземными телескопами (НТ) или дополнять действия НТ для улучшения времени предупреждения о падении на Землю ОНТ и уточнения параметров его движения [2, 3].

Возможность обнаружения астероида с помощью НТ определялась сравнением реализуемого в момент наблюдения значения угла солнечной элонгации ψ , определяемого взаимным положением Солнца, Земли и астероида, с минимальным допустимым значением $\psi_{\text{д}}$. Полагалось, что для обнаружения опасного небесного тела (ОНТ) допустимый угол $\psi_{\text{д}} \approx 55^\circ$.

Емельянов Владимир Алексеевич, д-р техн. наук, профессор Центрального научно-исследовательского института машиностроения (ЦНИИмаш); e-mail: vaem45@tsniimash.ru.

Ёлкин Константин Сергеевич, канд. техн. наук, исполняющий обязанности начальника отделения Центрального научно-исследовательского института машиностроения (ЦНИИмаш); e-mail: yolkins@tsniimash.ru.

Бодрова Юлия Сергеевна, канд. техн. наук, инженер 1 категории Центрального научно-исследовательского института машиностроения (ЦНИИмаш); e-mail: bodrovays@tsniimash.ru.

Меркушев Юрий Константинович, ведущий инженер Центрального научно-исследовательского института машиностроения (ЦНИИмаш); e-mail: merkushevuk@tsniimash.ru.

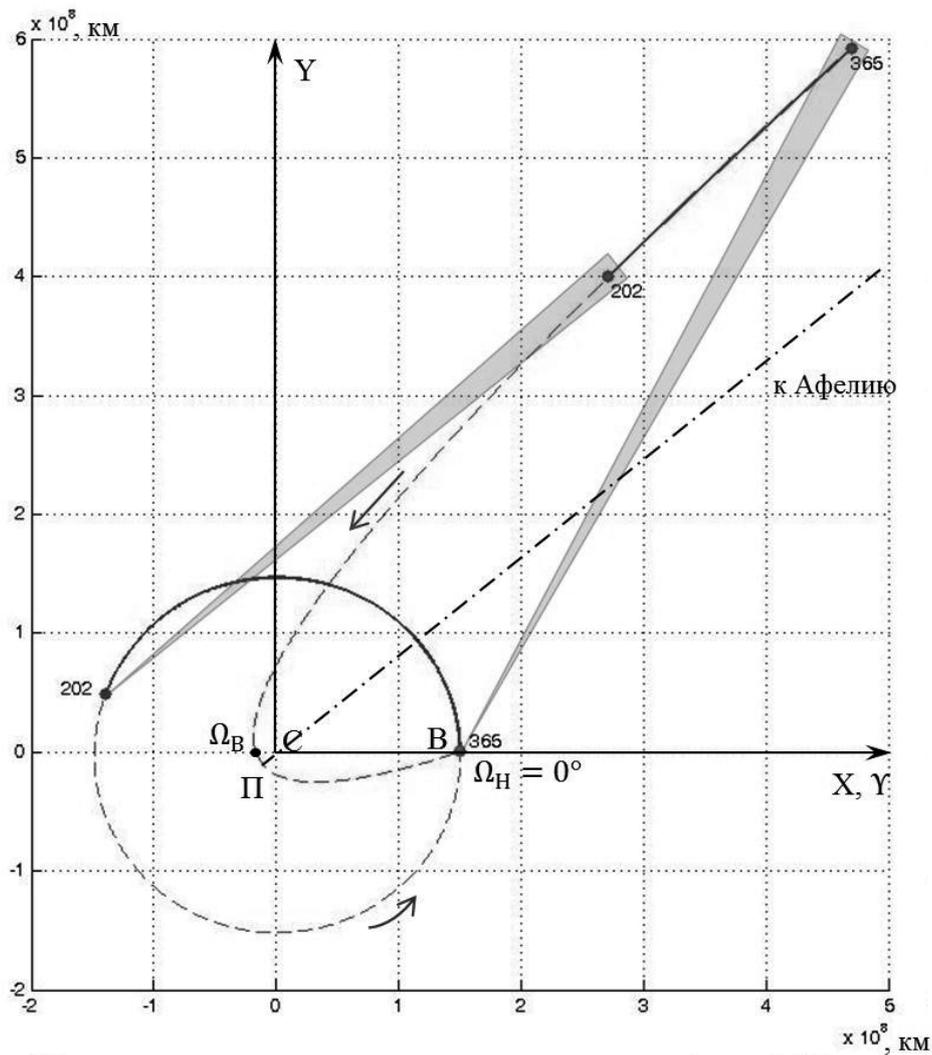


Рис. 1. Зона видимости наземным телескопом орбиты прямого движения транснептунового астероида от перигелия к точке встречи с Землей B , имеющей координаты $B(X,0,0)$ при $Q = 40$ а.е., $q = 0,1$ а.е., $i = 0^\circ$, $\Omega_B = 180^\circ$, $\omega_\pi = 36,437^\circ$: 1 — орбита Земли, 2 — орбита астероида.

Полагалось, что астероид является опасным небесным телом (ОНТ), а его траектория — столкновительной. Столкновение астероида с Землей происходит в некоторой точке их встречи B , являющейся одним из узлов орбиты ОНТ и имеющей гелиоцентрические координаты $X = 1$ а.е., $Y = Z = 0$. Возможны четыре варианта движения астероида к точке встречи B : прямое движение от перигелия (ПДП), прямое движение от афелия (ПДА), обратное движение от афелия (ОДА), обратное движение от перигелия (ОДП). Предварительно были рассмотрены каждый из этих вариантов на примере орбиты транснептунового астероида с наклоном $i = 0^\circ$ и афелийным и перигелийным расстояниями $Q = 40$ а.е. и $q = 0,1$ а.е. Они различаются величинами

долгот восходящего узла Ω_B и аргументом перигелия ω_π .

На рис. 1 приведены круговая орбита Земли (1) и вытянутая орбита ПДП астероида (2) с $\Omega_B = 180^\circ$ и $\omega_\pi = 36,437^\circ$. Обозначены положения перигелия P , восходящего Ω_B и нисходящего Ω_H узлов орбиты. Стрелками показаны направления движения Земли и астероида. Положения Земли и астероида рассчитывались на моменты времени, предшествующие их встрече путём перемещения Земли и астероида от точки B в противоположных направлениям стрелок. Для каждой пары положений Земли и астероида проверялось выполнение условия его видимости наземным телескопом с регистрацией времени t_B , отсчитываемого от момента

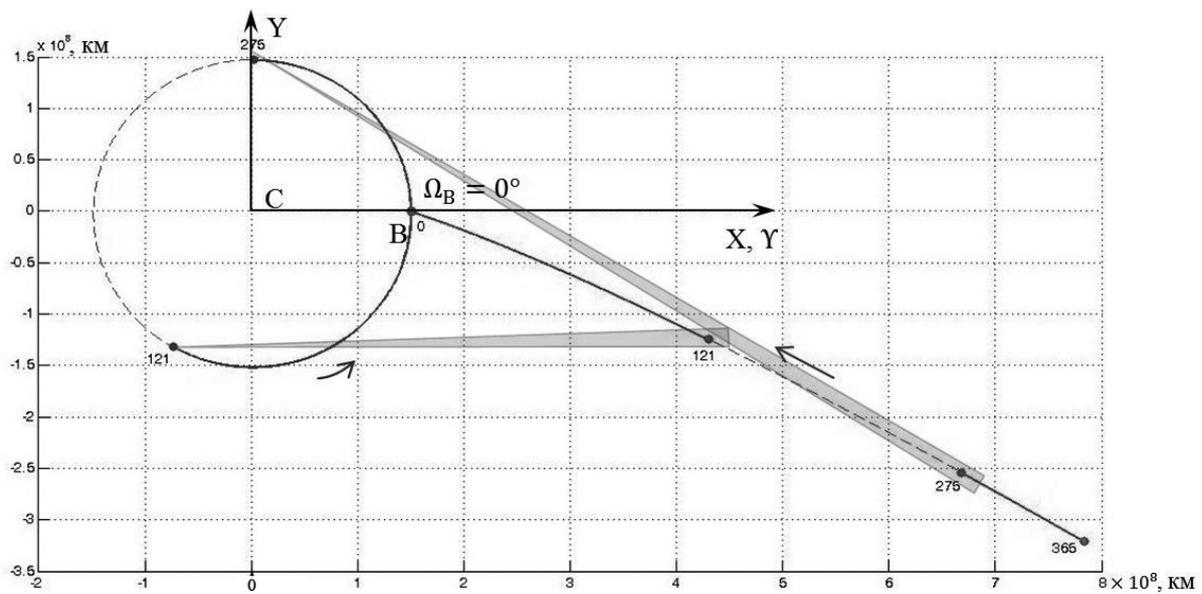


Рис. 2. Зона видимости наземным телескопом орбиты прямого движения транснептунового астероида от афелия к точке встречи с Землей B , имеющей координаты $B(X,0,0)$ при $Q = 40$ а.е., $q = 0,1$ а.е., $i = 0^\circ$, $\Omega_B = 0^\circ$, $\omega_\pi = 143,563^\circ$.

встречи Земли и астероида. Определялись границы интервалов времени видимости [4]. Соответствующие им участки орбит Земли и астероида обозначались непрерывными линиями.

Как следует из рис. 1, интервал видимости, ограниченный условиями солнечной элонгации, составляет 202–366 сут. В это время астероид с орбитой ПДП находится на очень большом ($\sim 4\text{--}5$ а.е.) расстоянии от наземного телескопа. Обнаружение малого астероида размером $\sim 50\text{--}100$ м не представляется возможным при дальности наблюдения ≥ 3 а.е. Может обнаруживаться [5, 6] очень большой (≥ 500 м) астероид. Однако нельзя провести надёжное прогнозирование столкновения его с Землей на будущий момент встречи, удаленный от последнего момента обнаружения на 202 сут. Поэтому можно уверенно полагать, что для предупреждения о падении на Землю малого астероида на орбите ПДП с указанными выше параметрами *необходимо* использование космического телескопа (КТ), осуществляющего обзорно-поисковые наблюдения для обнаружения ранее неизвестных ОНТ.

На рис. 2 изображена траектория астероида, движущегося к Земле по орбите прямого движения от афелия (ПДА) с параметрами $Q = 40$ а.е., $q = 0,1$ а.е., $i = 0^\circ$, $\Omega_B = 0^\circ$, $\omega_\pi = 143,563^\circ$. В данном случае времена види-

мости t_B астероида наземными телескопами находятся в двух широких диапазонах значений от 0 до 121 сут. и от 275 до 365 сут. Наблюдение астероида будет проводиться при благоприятных для НТ малых фазовых углах φ и дальностях наблюдения. НТ должны обеспечивать беспрерывное сканирование полем зрения небесной сферы. Время ее однократного обзора $T_{обз}$ не должно превышать время $T_{2\beta}$ прохождения астероида через перенацеливаемое поле зрения НТ. При выполнении этого условия космический телескоп *не нужен* для обнаружения малого астероида с вышеуказанными орбитальными параметрами. Отметим, что выполнение этого условия возможно лишь при значительном (более 5) количестве НТ типа “Pan-STARRS”.

На рис. 3 представлена траектория астероида, движущегося к точке встречи с Землей от афелия по орбите обратного движения (ОДА). Астероид находится в зоне видимости наземных телескопов при значениях времени t_B от 0–87 сут. до момента встречи. Реализуемые малые фазовые углы и дальности наблюдения указывают, что и в данном случае *использование КТ не является необходимым*.

Рис. 4 иллюстрирует траекторию движения тела от перигелия к Земле по орбите обратного движения (ОДП). Из него видно, что обнаружение астероида наземными телескопами возможно в ранние моменты времени,

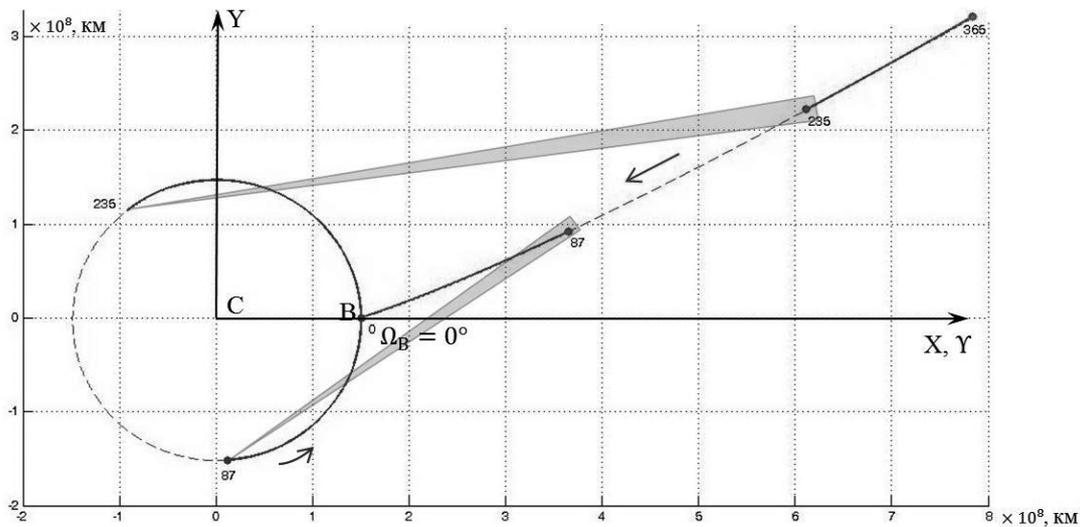


Рис. 3. Зоны видимости наземным телескопом орбиты обратного движения транснептунового астероида от афелия к точке встречи с Землей В, имеющей координаты $B(X,0,0)$ при $Q = 40$ а.е., $q = 0,1$ а.е., $i = 180^\circ$, $\Omega_B = 0^\circ$, $\omega_\pi = 143,563^\circ$

отстоящие на 69–161 сут. от момента встречи. Этот интервал видимости ОНТ на траектории ОДП находится существенно ближе к моменту встречи, чем интервал видимости траектории ПДП. Однако астероид обнаруживается наземными телескопами только задолго до встречи с Землей. Поэтому определяемая приближённая орбита должна уточняться более поздними измерениями космическими телескопами. Для них выполняется условие на угол солнечно элонгации. Они смотрят на астероид сбоку от направления на Солнце.

При траектории типа ОДП астероида от перигелия целесообразно и необходимо использование КТ для уточнения параметров его орбиты в течение более позднего времени, составляющего менее 59 сут. до столкновения с Землей. КТ может использовать данные о параметрах приближенной орбиты ОНТ, полученные от наземных телескопов.

Нами были определены зоны видимости наземными телескопами астероидов с 32 вариантами параметров Q, q орбит четырех типов (ПДП), (ПДА), (ОДП), (ОДА). Временные интервалы видимости и оценки необходимости (знаки «+» или «-») использования космических телескопов даны в табл. 1. Темно-серым цветом указана целесообразность функционирования КТ в режиме обзорно-поискового наблюдения части небесной сферы между Солнцем и Землей. Светло-серый цвет указывает на целесообразность использования КТ в режиме сопровождения ОНТ, обнаруженного

НТ. Использование КТ требуется в основном для обнаружения астероидов на траекториях ПДП, а также на некоторых траекториях ОДП. Полученная закономерность также подтверждена результатами имитационного моделирования функционирования КТ при регистрациях ОНТ на широком множестве их столкновительных орбит. Для траекторий ПДП необходимо использование КТ в основном режиме их функционирования, а именно в режиме обзорно-поискового наблюдения. Это относится к широкому множеству значений параметров орбит ПДП: $Q > 6$ а.е., $q < 0,7$ а.е., включая транснептуновые астероиды и астероиды Главного пояса. После обнаружения ОНТ хотя бы одним космическим телескопом, оба российских КТ переводятся в режим его сопровождения с проведением синхронно-базисных высокоточных позиционных измерений [6].

Если наземный телескоп обнаруживает астероид на траектории ОДП только за длительное время до встречи с Землей, то КТ функционирует в режиме сопровождения с использованием приближенных данных, получаемых от зарубежных НТ задолго до встречи астероида с Землей. Обеспечиваемая наземными телескопами погрешность определения угловых положений не должна превышать ширину углового поля зрения КТ. Указанный режим работы КТ повышает точность определения параметров движения по сравнению с точностью, обеспечиваемой НТ

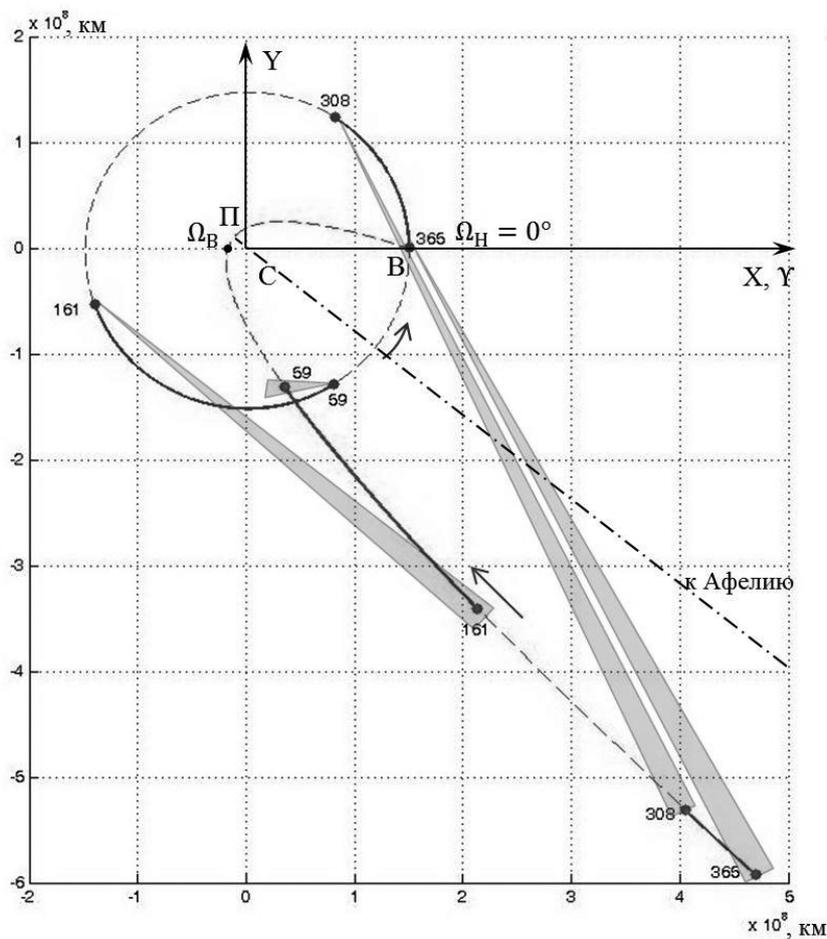


Рис. 4. Зоны видимости наземным телескопом орбиты обратного движения транснептунового астероида от перигелия к точке встречи с Землей B , имеющей координаты $B(X,0,0)$ при $Q = 40$ а.е., $q = 0,1$ а.е., $i = 180^\circ$, $\Omega_B = 0^\circ$, $\omega_\pi = 36,437^\circ$

“Pan-STARRS”. Повышение точности обусловлено: позиционными измерениями, производимыми при меньших значениях времени до момента встречи с Землей, а также синхронно-базисными измерениями положений ОНТ двумя КТ.

В обоих указанных случаях возможно также:

- взаимодействие отечественных КТ с наземными радиотелескопами ближнего наблюдения, которые могут привлекаться для подтверждения оценки опасности;

- привлечение зарубежных телескопов фундаментальных космических исследований, для оперативного определения физико-химических параметров обнаруженного ОНТ.

Целесообразна координация наблюдений малых небесных тел, проводимых наземными зарубежными телескопами и перспективной российской космической системы «Небосвод-

2», объединяющей два проекта: «Небосвод» и «Космический барьер» [5]. Потребуется проведение совместных мероприятий по выработке целеуказаний для российских КТ. При их получении КТ оперативно переводятся из основного обзорно-поискового режима наблюдения в режим сопровождения опасного объекта для уточнения параметров его орбиты. Далее проводится съемка ОНТ космическими телескопами КС «Небосвод-2». Формируется единая координатно-временная последовательность изображений, регистрируемая на ФПУ обоих КТ с учетом различия времён запаздывания поступления на них сигнала от ОНТ.

Для более достоверной оценки опасности будет также собираться и использоваться некоординатная информация о физико-химических свойствах обнаруживаемого астероида [7].

Таблица 1. Времена видимости t_B наземными телескопами астероидов, предшествующие моменту их падения на Землю

Вариант	ПДП(1)	ПДА(2)	ОДА(3)	ОДП(4)
Параметры орбиты: $Q = 1,1$ а.е., $q = 0,1$ а.е.				
t_B , сут.	279-365	1-73 324-365	0-48 326-365	1-13 308-365
Необходимость КТ	+	-	-	-
Параметры орбиты: $Q = 1,1$ а.е., $q = 0,9$ а.е.				
t_B , сут.	104-362	4-280	0-33 160-222 338-365	0-26 144-205 331-365
Необходимость КТ	+	-	-	-
Параметры орбиты: $Q = 1,6$ а.е., $q = 0,1$ а.е.				
t_B , сут.	363-365	0-133	0-69	75-117
Необходимость КТ	+	-	-	+
Параметры орбиты: $Q = 1,6$ а.е., $q = 0,9$ а.е.				
t_B , сут.	61-347	0-230	0-37 169-291	0-23 137-239
Необходимость КТ	+	-	-	-
Параметры орбиты: $Q = 6$ а.е., $q = 0,1$ а.е.				
t_B , сут.	211-365	0-120 280-365	0-84 234-365	65-153 303-365
Необходимость КТ	+	-	-	+
Параметры орбиты: $Q = 6$ а.е., $q = 0,9$ а.е.				
t_B , сут.	35-278	1-191	0-42 178-365	0-19 135-295
Необходимость КТ	+	-	-	-
Параметры орбиты: $Q = 40$ а.е., $q = 0,1$ а.е.				
t_B , сут.	202-365	0-121 275-365	0-87 235-365	59-161 308-365
Необходимость КТ	+	-	-	+
Параметры орбиты: $Q = 40$ а.е., $q = 0,9$ а.е.				
t_B , сут.	30-286	1-187 350-365	0-43 179-365	0-18 135-309
Необходимость КТ	+	-	-	-

Выводы

1) КТ необходимо использовать в режиме обзорно-поискового обнаружения ранее не известных столкновительных астероидов, идущих к точке встречи с Землей от перигелия по траектории прямого движения (ПДП);

2) В этом основном режиме работы КТ они должны быть ориентированы на область небесной сферы внутри орбиты Земли;

3) КТ должны использоваться в режиме сопровождения астероида, идущего к точке встречи с Землей от перигелия по траектории обратного движения (ОДП), если наземными телескопами получена приближенная траектория задолго до встречи астероида с Землей.

4) Обнаружение столкновительных астероидов, идущих к точке встречи с Землей от апогея, не требует использования КТ при условии, что наземные телескопы обеспечивают беспропускной обзор части небесной сферы, не ограниченной солнечной элонгацией.

5) Российские КТ могут дать существенный вклад в предупреждение об АКО при проведении мероприятий, обеспечивающих взаимодействие, при совместном функционировании отечественных КТ и зарубежных наземных средств предупреждения об АКО.

Литература

1. Шустов Б.М., Шугаров А.С., Нароенков С.А., Прохоров М.Е. Астрономические аспекты космических угроз: новые задачи и подходы к

- проблеме астероидно-кометной опасности после Челябинского события 15 февраля 2013 г. // *Астрономический журнал*. 2015. Т. 92. № 10. С. 867–880.
2. Lin F., Cutry R. et al. Development of the Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE) mission // *Proc of SPIE*, 2008, Vol. 7017 70170M. P. 1–12.
 3. Naroenkov S.A., Shustov B.M., Emel'yanenko V.V. On the arc length of observations of small solar system body sufficient to classify it as hazardous // *Cosmic Research*. 2013. Vol. 51. Iss. 5. P. 335–341.
 4. Емельянов В.А., Меркушев Ю.К., Рамалданов Р.П., Савельев М.И. Имитационные модели функционирования космических телескопов предупреждения о падении на Землю малых ОНТ // *Космонавтика и ракетостроение*. 2016. № 7. С. 97–107.
 5. Кулешов Ю.П., Мисник В.П., Нагаев К.Д., Емельянов В.А. и др. Космическая система обзора небесной сферы для обнаружения опасных небесных тел // *Околоземная астрономия 2015. Труды международной конференции. 31 августа – 5 сентября 2015 г. п. Терскол. М.: Янус-К, 2015. С. 168–174.*
 6. Емельянов В.А., Рамалданов Р.П. Алгоритм перевода космических телескопов в режим сопровождения обнаруженного астероида // *Космонавтика и ракетостроение*. 2014. № 3. С. 73–78.
 7. Емельянов В.А., Райкунов К.Г. Способ определения температуры, степени черноты и размера астероида космическим телескопом ИК диапазона // *Космонавтика и ракетостроение*. 2013. № 4. С. 154–162.
 - Journal], 2015, vol. 92, no. 10, pp. 867–880. (In Russian)
 2. Lin F., Cutry R. et al. Development of the Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE) mission. *Proc of SPIE*, 2008, Vol. 7017 70170M, pp. 1–12.
 3. Naroenkov S.A., Shustov B.M., Emel'yanenko V.V. On the arc length of observations of small solar system body sufficient to classify it as hazardous. *Cosmic Research*, 2013, vol. 51, iss. 5, pp. 335–341.
 4. Emel'yanov V.A., Merkushev Yu.K., Ramaldanov R.P., Savel'ev M.I. Imitatsionnye modeli funktsionirovaniya kosmicheskikh teleskopov preduprezhdeniya o padenii na Zemlyu malykh ONT [Simulation models of the functioning of space telescopes warning of the fall of small ONTs to the Earth]. *Kosmonavtika i raketostroenie* [Astronautics and rocket science], 2016, no. 7, pp. 97–107. (In Russian)
 5. Kuleshov Yu.P., Misnik V.P., Nagaev K.D., Emel'yanov V.A. et al. Kosmicheskaya sistema obzora nebesnoy sfery dlya obnaruzheniya opasnykh nebesnykh tel [Cosmic system of a survey of the celestial sphere for the detection of dangerous celestial bodies]. In: *Trudy mezhdunarodnoy konferentsii "Okolozemnaya astronomiya 2015"* [Proc. of the International Conference "Near-Earth Astronomy 2015". August 31 – September 5, 2015, Terskol. Moscow, Yanus-K Pub., 2015, pp. 168–174. (In Russian)
 6. Emel'yanov V.A., Ramaldanov R.P. Algoritm perevoda kosmicheskikh teleskopov v rezhim soprovodheniya obnaruzhennogo asteroida [Algorithm of the translation of space telescopes into the tracking mode of the detected asteroid]. *Kosmonavtika i raketostroenie* [Cosmonautics and rocket engineering], 2014, no. 3, pp. 73–78. (In Russian)
 7. Emel'yanov V.A., Raykunov K.G. Sposob opredeleniya temperatury, stepeni chernoty i razmera asteroida kosmicheskimi teleskopom IK diapazona [Method for determining the temperature, degree of blackness, and the size of an asteroid by an infrared cosmic telescope]. *Kosmonavtika i raketostroenie* [Cosmonautics and rocket engineering], 2013, no. 4, pp. 154–162. (In Russian)

References

1. Shustov B.M., Shugarov A.S., Naroenkov S.A., Prokhorov M.E. Astronomicheskie aspekty kosmicheskikh ugroz: novye zadachi i podkhody k probleme asteroidno-kometnoy opasnosti posle Chelyabinskogo sobytiya 15 fevralya 2013 g. [Astronomical aspects of space threats: new tasks and approaches to the problem of asteroid-comet danger after the Chelyabinsk event February 15, 2013]. *Astronomicheskii zhurnal* [Astronomical