

УДК 520.6.07/004.02/629.78

## РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ УВЕЛИЧЕНИЯ ВРЕМЕНИ НАКОПЛЕНИЯ ПОЛЕЗНОГО СИГНАЛА, РЕГИСТРИРУЕМОГО В РЕЖИМЕ ВЗН НА ФПУ КОСМИЧЕСКОГО ТЕЛЕСКОПА ОБНАРУЖЕНИЯ АСТЕРОИДОВ

Емельянов В. А., Ёлкин К. С., Бодрова Ю. С., Меркушев Ю. К.,  
Рамалданов Р. П.

ASTEROID DETECTION SPACE TELESCOPE CCD CAMERA OPERATING IN TDI  
MODE USEFUL SIGNAL ACCUMULATION TIME INCREASE ASSESSMENT RESULTS

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

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

*Abstract.* To ensure the detection of asteroids approaching Earth, it is possible to place space telescopes (STs) in the orbit of the Earth's revolution around the Sun, to control a continuous barrier zone in outer space around the Earth.

An algorithm for outer space scanning is examined, in which the field of view of a space telescope rotates around the certain direction between the telescope placed on the Earth's heliocentric orbit and some other point also belonging to this orbit. Thus space telescope CCD array also rotates around this direction. As a result of rotation, the length of the asteroid image path along the pixels of the CCD column is increased by 4–5 times, depending on the number of charge accumulation steps being realized. This new surveying configuration allows to reduce significantly (up to ~ 40 %) the minimal size of an asteroid being detected in comparison with the single-frame shooting mode.

The expediency of continuous scanning by a space telescope using a CCD column operating in the TDI mode of a limited part of the celestial sphere is substantiated. A significant reduction in the requirements for the system of orientation and stabilization of spacecraft was reached.

*Keywords:* space telescope, heliocentric orbit, linear CCD, hazardous celestial body, instantaneous field of view, asteroid and comet hazard.

С ростом числа обнаруженных наземными телескопами астероидов, пересекающих орбиту Земли и регистрацией падения опасных небесных тел на её поверхность появились различные предложения по решению задачи астероидно-кометной опасности [1, 2]. Проблема пропуска малых астероидов наземными телескопами сделала актуальной задачу поиска способов применения космических телескопов (КТ) для её решения. Предлагались такие системы с использованием НТ и КТ которые решают эту проблему обзором небесной сферы [3], контролем наиболее опасных

направлений [4, 5] или созданием непрерывной барьерной зоны гарантированного обнаружения [6].

Рассматривается космический телескоп Т, находящийся на орбите обращения Земли (З) вокруг Солнца (С). Контролируемой барьерной зоной (БЗ) небесной сферы является полый кольцевой конус, который формируется мгновенным полем зрения (МПЗ) при его вращении вокруг некоторого выбранного направления [7]. На рис. 1 показано кольцо — основание этого конуса. Оно находится в плоскости, перпендикулярной направлению ТК,

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: yolkinks@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.

Рамалданов Роман Петрович, аспирант, инженер 1 категории Центрального научно-исследовательского института машиностроения (ЦНИИмаш); e-mail: ramaldanovrp@tsniimash.ru.

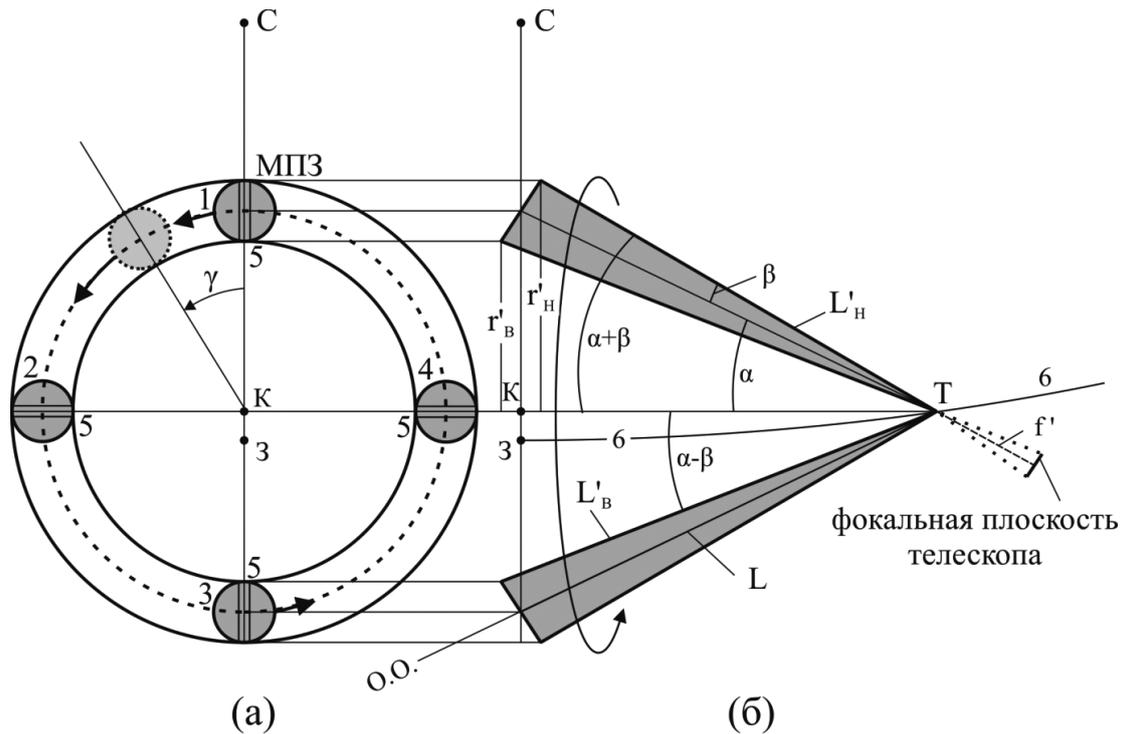


Рис. 1. Сечение кольцевой контролируемой барьерной зоны плоскостью эклиптики (б) и сечение плоскостью, перпендикулярной оси вращения мгновенного поля зрения (МПЗ) телескопа (а). Условные обозначения: 1, 3 — положения вращающегося МПЗ телескопа Т в плоскости эклиптики, соответствующие значениям азимутального угла вращения  $\gamma$ , равным 0 и 180°; 2, 4 — положения МПЗ, не лежащие в плоскости эклиптики и соответствующие значениям азимутального угла вращения 90° и 270°; 5 — положения проекции на предметную область ПЗС-линейки при азимутальных углах вращения  $\gamma = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ ; 6 — участок орбиты Земли с телескопом Т, находящимся впереди Земли (3)

вокруг которого вращается оптическая ось (ОО) телескопа Т. Точкой К может быть любая точка орбиты Земли. Угол между направлением ТК и ОО равен  $\alpha$ . Основание конуса МПЗ обозначено кругом, который вращается внутри кольца справа налево. Кольцо является барьерной зоной, через которую проходит астероид, который идет к Земле, находящейся вблизи центра кольца.

Наружной границей кольца является круг радиусом  $r_h = L \cos \alpha \operatorname{tg}(\alpha + \beta)$ , внутренней границей — круг радиусом  $r_b = L \cos \alpha \operatorname{tg}(\alpha - \beta)$ . Здесь  $\beta$  — угловая полуширина МПЗ,  $L$  — наклонная дальность от телескопа Т до центра вращающегося основания МПЗ. МПЗ представляет собой конус, вершина которого находится в точке Т. Его осью является участок ОО телескопа Т длиной  $L$ . Наружная образующая конуса мгновенного поля зрения  $L_h$  в его сечении плоскостью, перпендикулярной направлению ТК, равна  $L \cos(\alpha) / \cos(\alpha + \beta)$ . Внутренняя образующая  $L_b$  равна  $L \cos(\alpha) / \cos(\alpha - \beta)$ . Основанием ко-

нуса является плоскость, перпендикулярная ОО. Внутри МПЗ показана проекция ПЗС-линейки 5 на контролируемую зону. Её короткие столбцы пикселей направлены вдоль направления вращения МПЗ. Они являются столбцами накопления заряда от регистрируемого в каждом пикселе точечного изображения. Накопление заряда производится за счёт его переноса по элементам накопительного столбца (НС) со скоростью, равной линейной скорости вращения НС. Это накопление происходит до тех пор, пока изображение на переместится из одного накопительного столбца в другой вследствие собственного движения астероида к Земле. Время этого перемещения увеличивается с увеличением длины пути изображения поперек НС. При вращении НС длина пути возрастает по сравнению с размером пикселя  $a_{\text{п}}$ . Длинные строки ПЗС-линейки направлены перпендикулярно направлению вращения МПЗ.

Направления ТК и ТЗ, обозначенные на рис. 1, находятся в плоскости эклиптики. На-

Таблица 1. Радиальные координаты наружных, центральных и внутренних элементов кольца БЗ и их расстояния от телескопа Т, приведённые к расстоянию  $L$

$r_n / L$	$r_c / L$	$r_b / L$	$L_n / L$	$L_c / L$	$L_b / L$
0,227	0,174	0,121	1,011	1,000	0,992
$\alpha = 10^\circ, \beta = 3^\circ$					

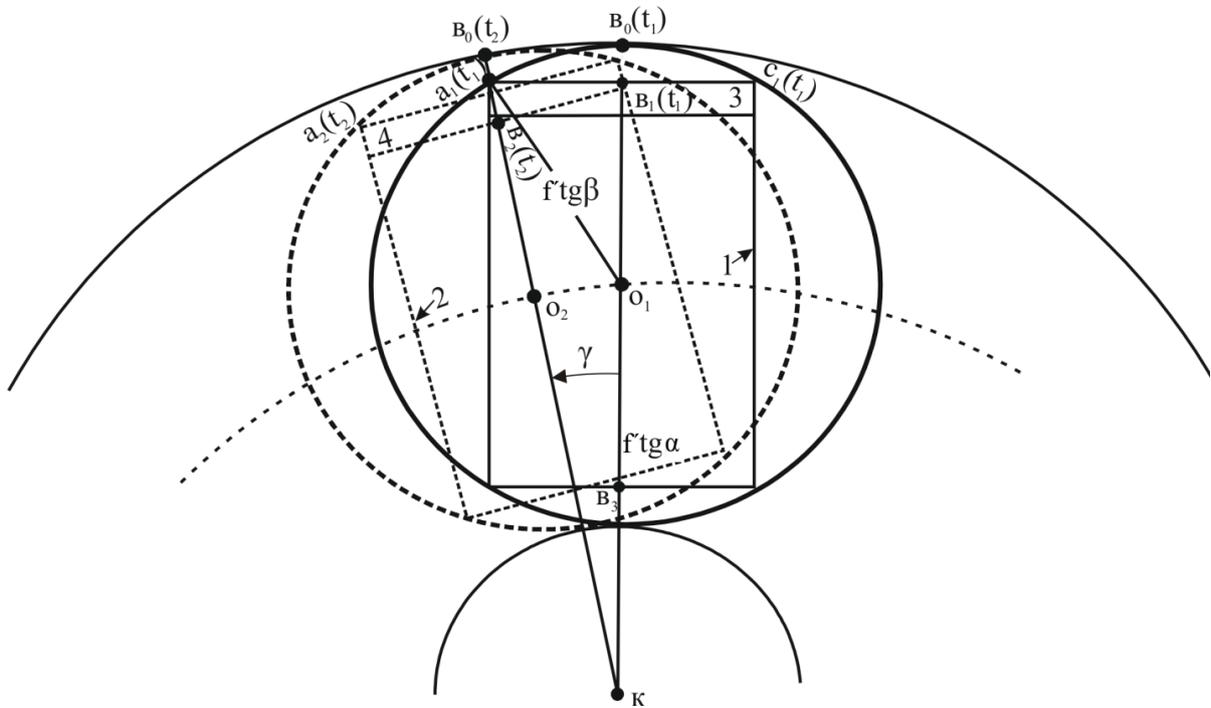


Рис. 2. Положения проекции астероида (точки  $a_1(t_1)$ ,  $a_2(t_2)$ ) в ПЗС-линейке, в которых он входит во вращающийся накопительный столбец в момент  $t_1$  и выходит из него в момент  $t_2$ . Условные обозначения: 1, 2 — положения ПЗС-линейки, 3, 4 — положения накопительного столбца

правление ЗКС располагается в плоскости, перпендикулярной плоскости эклиптики.  $r_n$ ,  $r_c$ ,  $r_b$  — наружный, центральный и внутренний радиусы контролируемой барьерной зоны,  $L_n$ ,  $L_b$  — расстояния от телескопа Т до наружного и внутреннего краёв мгновенного поля зрения при сечении его плоскостью, перпендикулярной оси вращения телескопа Т.

Можно выразить через расстояние  $L$  от центра МПЗ до телескопа Т диаметр круга МПЗ, равный  $r_n - r_b$ . Он составляет  $L \cos \alpha \tan \beta$  для рис. 1, соответствующего предметной области телескопа.

Оценим указанные величины при угле сканирования  $\alpha = 10^\circ$  и мгновенном поле зрения  $2\beta = 6^\circ$ . Полученные значения приведены в табл. 1.

На рис. 2, относящемуся к фокальной плоскости телескопа, показаны в крупном масштабе положения наружного накопитель-

ного столбца ПЗС-линейки в два близких момента времени  $t_1$  и  $t_2$ . Они отличаются малой величиной времени, за которое наружный накопительный столбец, находящийся в положении 3, переместится в положение 4. Это перемещение обязано вращению МПЗ вокруг направления ТК, обозначенного на рис. 1. В момент  $t_1$  изображение астероида, идущего к Земле со стороны Солнца, начинает входить в накопительный столбец через точку  $a_1$ , принадлежащую его левой границе. В момент  $t_2$  изображение начинает выходить из НС, когда оно переместилось поперек НС из-за того, что астероид движется к Земле. В момент  $t_2$  изображение астероида проходит не через левую границу наружного накопительного столбца, а через пиксель, в котором закончилось накопление заряда. Изображение выходит из вращающегося НС, когда он переместится на количество пикселей, равное реализуемому числу шагов накопления  $n_{шн}$ .

Рассмотрим ПЗС-линейку, находящуюся в фокальной плоскости телескопа Т. На рис. 2 показаны два положения ПЗС-линейки. Точка  $O_1$  является центром ПЗС-линейки. При её вращении этот центр перемещается по окружности радиуса  $f' \operatorname{tg}(\alpha)$ . Радиус  $r_{\text{МПЗ}}$  основания конуса мгновенного поля зрения на ПЗС-линейке равен

$$r_{\text{МПЗ}} = f' \operatorname{tg} \beta.$$

Он равен расстоянию  $O_1 v_0(t_1)$ , обозначенному на рис. 2.

Точка К располагается на линии «Телескоп Т–К», вокруг которой происходит вращение мгновенного поля зрения телескопа, как это показано на рис. 1. В момент времени  $t_1$  в круг радиусом  $v_0(t_1)O_1$  вписана ПЗС-линейка с длинными строками и короткими столбцами пикселей. Положение МПЗ в момент  $t_1$  обозначено окружностью в виде сплошной линии. Количество пикселей в строках  $N$ , в накопительных столбцах —  $M$ . Общее количество пикселей в линейке удовлетворяет условию

$$(M^2 + N^2)^{1/2} = 2\beta/\delta,$$

где  $\delta$  — угловой размер пикселя, а  $(M^2 + N^2)^{1/2}\delta$  — угловой размер МПЗ.

Пунктирной линией обозначено положение МПЗ на некоторый последующий момент времени  $t_2$ , в случае, когда ПЗС-линейка вращается и фотоприёмное устройство работает в режиме ВЗН.

Пусть левая точка  $a_1$  рассматриваемого НС перешла в точку  $a_2$ , также принадлежащую наружной окружности МПЗ. Эта окружность переместилась влево, поскольку её центр прошёл дугу  $O_1O_2$  в результате разворота точки  $O_1$  вокруг центра вращения К. Эта дуга равна угловой скорости сканирования МПЗ  $\omega_{\text{СК}}$ , умноженной на время  $t_2 - t_1$ . Угол  $\gamma$  азимутального поворота радиуса  $O_1K$  или угловой размер дуги  $O_1O_2$  равен  $\omega_{\text{СК}}(t_2 - t_1)$ . Он показан на рис. 2.

Зададим момент  $t_2$  так, чтобы точка  $v_1$ , которая в момент  $t_1$  находилась на верхней границе НС в его середине, перешла бы на нижнюю границу НС в его середине и заняла положение  $v_2(t_2)$ . Расстояние между верхней и нижней границами НС равно размеру пикселя  $a_{\text{п}}$ . Поэтому

$$v_2(t_2)K = v_1(t_1)K - a_{\text{п}}.$$

Изображение находится в перемещающемся накопительном столбце до тех пор, пока,

двигаясь к точке К, оно не перейдёт его нижнюю границу в момент  $t_2$ . После этого перехода заряд от него перестанет накапливаться в рассматриваемом НС. Таким образом, накопление полезного сигнала начинается с момента  $t_1$ , когда изображение астероида находится в левой точке НС  $a_1(t_1)$ , а заканчивается, когда оно перешло в центральную точку  $v_2(t_2)$  этого накопительного столбца вследствие вращения НС. Длина пути изображения во вращающемся НС равна расстоянию  $a_1(t_1) - v_2(t_2)$  и превышает ширину неподвижного НС, которая равна  $a_{\text{п}}$ . Следовательно, время накопления полезного сигнала  $t_2 - t_1$  будет превышать время, равное расстоянию  $a_{\text{п}}$ , делённому на скорость собственного движения астероида в радиальном направлении  $V_r$ . Это превышение зависит от величины  $h$  стрелки прогиба  $v_0(t_1) v_1(t_1)$  дуги  $a(t_1)c_1(t_1)$ , в которую вписан НС.

В фокальной плоскости расстояние между точкой  $v_0(t_1)$  и центром вращения поля зрения К в момент  $t_1$  равно

$$v_0(t_1)K = f'(\operatorname{tg} \beta + \operatorname{tg} \alpha), \quad (1)$$

а расстояние между точкой  $v_0(t_1)$  и вращающимся центром МПЗ телескопа  $O_1$  равно

$$O_1 v_0(t_1) = r_{\text{МПЗ}} = f' \operatorname{tg} \beta.$$

Стрелка прогиба  $h$  определяется по следующей формуле:

$$h = f' \operatorname{tg} \beta - N a_{\text{п}}/2, \quad (2)$$

Поэтому из (1) и (2), учитывая, что  $v_1(t_1)K = v_0(t_1)K - h$ , получаем

$$v_1(t_1)K = v_0(t_1)K - h = f' \operatorname{tg}(\alpha) + N a_{\text{п}}/2.$$

Из прямоугольного треугольника  $a_1(t_1)v_1(t_1)K$  можно найти расстояние  $a_1(t_1)K$  и определить разность между расстояниями  $a_1(t_1)K$  и  $v_1(t_1)K$ . Затем вычисляется искомая разность  $a_1(t_1) - v_2(t_2)$ , обозначенная через  $x$ :

$$x = ((v_1(t_1)K)^2 + (a_1(t_1)v_1(t_1))^2)^{1/2} - v_1(t_1)K + a_{\text{п}}.$$

Величина  $x$  представляет собой длину пути в фокальной плоскости, которую проходит изображение астероида, прежде чем оно перейдёт на соседний накопительный столбец вследствие собственного движения астероида. Альтернативой является длина пути, которую

Таблица 2. Зависимость от реализуемого числа шагов накопления заряда  $n_{\text{шн}}$  количества пикселей  $\xi$ , через которые проходит точечное изображение астероида при его перемещении через накопительный столбец ПЗС-линейки

$n_{\text{шн}}$	100	500
$\xi$	1	4
$d_{\xi}/d$	1	0,7
$\alpha = 10^\circ, \beta = 10^\circ, \delta = 1,374$ угл. с		

проходит изображение, если ФПУ не вращается. В этом случае длина пути изображения равна  $a_{\text{п}}$ .

Величина  $x$  зависит от количества реализуемых шагов накопления  $n_{\text{шн}}$  в накопительном столбце. Отношение  $x/a_{\text{п}}$  обозначим через  $\xi$ . Оно выражает относительное увеличение длины пути изображения и, следовательно, увеличения времени накопления полезного сигнала, обусловленное вращением ПЗС-линейки относительно направления «Телескоп Т – точка К».

Если составляющая скорости собственного движения астероида в направлении, перпендикулярном длине накопительного столбца ПЗС-линейки равна  $V_A$ , то время накопления заряда равно  $t_{\text{н}} = L\delta\xi/V_A$ .

Реализуемое количество шагов накопления  $n_{\text{шн}}$  заряда равно количеству пикселей, через которые пробегает изображение астероида вдоль НС за счёт движения самого НС. Величина  $\xi$  зависит от реализуемого числа шагов накопления  $n_{\text{шн}}$ . В табл. 2 дана зависимость величин  $\xi$  и  $t_{\text{н}}$  от  $n_{\text{шн}}$  при углах  $\alpha$  и  $\beta$ , равных  $10^\circ$ , и угловом размере пикселя  $\delta = 1,374$  угл. с.

Если дальность наблюдения  $L \sim 0,3$  а.е., скорость астероида  $V_A = 40$  км/с, то величина  $L\delta/V_A$  равна 7,6 с. Она представляет собой время накопления полезного сигнала  $t_{\text{н}}$  при прохождении изображения астероида поперек НС за счёт собственного движения астероида к точке встречи с Землёй. Такое время накопления полезного сигнала реализовалось бы в отсутствии вращения МПЗ, если бы производилась кадровая съёмка при дискретном сканировании этим МПЗ контролируемой барьерной зоны. При непрерывном сканировании БЗ с использованием режима ВЗН, изображение астероида проходит в направлении, перпендикулярном длине НС, более длинный путь. Коэффициент  $\xi$  увеличения длины пути при количестве  $n_{\text{шн}} = 500$  возрастает до 4 (табл. 2). Поэтому время  $t_{\text{н}}$  увеличивается с 7,6 с до 30 с. Это увеличение

очень существенно (в  $\sim 1,4$  раза) уменьшает размер  $d$  обнаруживаемого астероида.

### Заключение

- обоснована целесообразность непрерывного сканирования космическим телескопом ограниченной части небесной сферы — барьерной зоны обязательной регистрации малых астероидов с использованием ПЗС-линейки, функционирующей в режиме ВЗН;
- основными факторами, влияющими на увеличение времени  $t_{\text{н}}$  являются: оптимизация угла  $\alpha$  между вращаемой оптической осью телескопа и направлением, вокруг которого она вращается, а также оптимизация величины угловой скорости этого вращения;
- несомненным преимуществом непрерывного равномерного сканирования мгновенным полем зрения без режимов ускорения, замедления и успокоения также является существенное снижение требований к системе ориентации и стабилизации КА.

### Литература

1. Шустов В.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. 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.
3. Bakut P.A., Vygon V.G., Shargorodskii V.D., Shumilov Yu.P. Statistical synthesis of the optimal algorithm for detecting celestial objects observed in the optical band // Journal of Communications Technology and Electronics. 2009. Vol. 54. No. 8. P. 925–936.
4. Генова А.Л., Данэм Д.В. Использование Венеры для расположения космических обсерваторий с целью обнаружения потенциально опасных астероидов // Космические исследования. 2010. Т. 48. № 5. С. 433–439.

5. Прохоров М.Е., Шугаров А.С. Система обнаружения Дневных Астероидов (СОДА), Семинар «Средства и методы обнаружения опасных небесных тел», Москва, 25 марта 2015, ИНАСАН.
6. Емельянов В.А., Савельев М.И., Ёлкин К.С., Бодрова Ю.С., Меркушев Ю.К., Рамалданов Р.П. Показатели целевой эффективности системы оперативного предупреждения об астероидно-кометной опасности «Космический барьер» // Технологии гражданской безопасности. 2016. Т. 13. № 1. С. 44–49.
7. Емельянов В.А. Перспективы использования космических телескопов для обнаружения малых опасных тел // Космонавтика и ракетостроение. 2008. № 2. С. 117–122.
3. Bakut P.A., Vygon V.G., Shargorodskii V.D., Shumilov Yu.P. Statistical synthesis of the optimal algorithm for detecting celestial objects observed in the optical band. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2009, vol. 54, no. 8, pp. 925–936.
4. Genova A.L., Danem D.V. Ispol'zovanie Veneri dlya raspolozheniya kosmicheskikh observatoriy s tsel'yu obnaruzheniya potentsial'no opasnykh asteroidov [Use of Venus to locate space observatories to detect potentially dangerous asteroids]. *Kosmicheskie issledovaniya* [Space research], 2010, vol. 48, no. 5, pp. 433–439. (In Russian)
5. Prokhorov M.E., Shugarov A.S. Sistema obnaruzheniya Dnevnykh Asteroidov (SODA) [Daylight Asteroids Detection System (SODA)]. In: Proc. of seminar “Sredstva i metody obnaruzheniya opasnykh nebesnykh tel” [Seminar “Means and Methods for Detection of Dangerous Celestial Bodies”], Moscow, March 25, 2015, INASAN. (In Russian)
6. Emel'yanov V.A., Savel'ev M.I., Elkin K.S., Bodrova Yu.S., Merkushev Yu.K., Ramaldanov R.P. Pokazateli tselevoy effektivnosti sistemy operativnogo preduprezhdeniya ob asteroidno-kometnoy opasnosti “Kosmicheskii bar'er” [Indicators of the target efficiency of the operational warning system for asteroid-comet hazard “Space barrier”]. *Tekhnologii grazhdanskoy bezopasnosti* [Civil safety technologies], 2016, vol. 13, no. 1, pp. 44–49. (In Russian)
7. Emel'yanov V.A. Perspektivy ispol'zovaniya kosmicheskikh teleskopov dlya obnaruzheniya mal'kh opasnykh tel [Prospects of using space telescopes for detecting small dangerous bodies]. *Kosmonavtika i raketostroenie* [Cosmonautics and rocket engineering], 2008, no. 2, pp. 117–122. (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 Journal], 2015, vol. 92, no. 10, pp. 867–880. (In Russian)
2. Emel'yanov V.A., Merkushev Yu.K., Ramaldanov R.P., Savel'ev M.I. Imitatsionnye modeli funktsionirovaniya kosmicheskikh teleskopov preduprezhdeniya o padenii na Zemlyu mal'kh 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 engineering], 2016, no. 7, pp. 97–107. (In Russian)