

УДК 532.44 + 521

СРЕДСТВА, ВОЗМОЖНОСТИ И МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ АСТЕРОИДНОЙ И КОМЕТНОЙ ОПАСНОСТИ В ПРОЕКТЕ «ОРБИТАЛЬНАЯ ЗВЕЗДНАЯ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ»

*Чубей М. С.¹, Куприянов В. В.², Львов В. Н.³, Цекмейстер С. Д.⁴,
Бахолдин А. В.⁵, Цуканова Г. И.⁶, Маркелов С. В.⁷, Левко Г. В.⁸*

RESOURCES, FACILITIES, AND METHODS FOR SOLVING THE PROBLEMS OF ASTEROID AND
COMET HAZARD IN THE «ORBITAL STELLAR STEREOSCOPIC OBSERVATORY» PROJECT

Chubey M. S., Kouprianov V. V., Lvov V. N., Tsekmeister S. D., Bakholdin A. V., Zukanova G. I., Markelov S. V.,
Levko G. V.

Formulation of the “Orbital Stellar Stereoscopic Observatory” (OSSO) project is presented.
The project assumes allocation of two identical space probes in the vicinity of the L_4 and L_5
Sun-Earth Lagrangian points. Phase A is presented.

Keywords: space projects, space stereoscope, asteroid and comet hazard.

Введение

На стадии НИР проект «Орбитальная Звездная Стереоскопическая Обсерватория» (ОЗСО) [1] разработан как «производная» от НИР «Межпланетная Солнечная Стереоскопическая Обсерватория» (МССО) [2]. Конфигурации и МССО, и ОЗСО формируются одинаково — путем установки двух соответственно задачам идентично оснащенных космических аппаратов в окрестностях тригональных Лагранжевых центров либрации L_4 , L_5 в системе «Солнце – “барицентр системы Земля+Луна”» (рис. 1). Полная система

частных решений круговой ограниченной задачи трех тел содержит 5 точек, три из которых L_1 , L_2 и L_3 (рис. 1) указал Эйлер в 1767 г. [3] (линейные центры), а две остальные L_4 , L_5 — Лагранж пятью годами позже [4] (круговые центры). В «звездном» варианте для выполнения целевых наблюдений используется только один тип инструмента — астрограф.

На рис. 1 T_3 — Земля; треугольник $L_4L_5T_3$ обращается вокруг Солнца S с периодом в один год. Штрих-пунктир — расчетные апсидные орбиты гелиоцентрических переходов «Земля – L_5 » (d), или «Земля – L_4 »

¹Чубей Маркиян Семенович, канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник отдела позиционной астрономии Главной (Пулковской) астрономической обсерватории РАН; e-mail: mchubey@gao.spb.ru.

²Куприянов Владимир Викторович, старший научный сотрудник лаборатории наблюдательной астрометрии Главной (Пулковской) астрономической обсерватории РАН; e-mail: v.k@bk.ru.

³Львов Виктор Николаевич, канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник сектора эфемеридного обеспечения Главной (Пулковской) астрономической обсерватории РАН; e-mail: epos-gao@mail.ru.

⁴Цекмейстер Светлана Дмитриевна, научный сотрудник сектора эфемеридного обеспечения Главной (Пулковской) астрономической обсерватории РАН; e-mail: epos@gao.spb.ru.

⁵Бахолдин Алексей Валентинович, заведующий кафедрой прикладной и компьютерной оптики Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики; e-mail: bakholdin@aco.ifmo.ru.

⁶Цуканова Галина Ивановна, доцент кафедры прикладной и компьютерной оптики Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики; e-mail: zukanova@aco.ifmo.ru.

⁷Маркелов Сергей Викторович, канд. техн. наук, заведующий лабораторией перспективных разработок Специальной астрофизической обсерватории РАН; e-mail: markel@sao.ru.

⁸Левко Геннадий Владимирович, канд. техн. наук, заместитель главного инженера, начальник научно-технического комплекса ОАО «Научно-исследовательский институт телевидения»; e-mail: levgen@mail.ru.

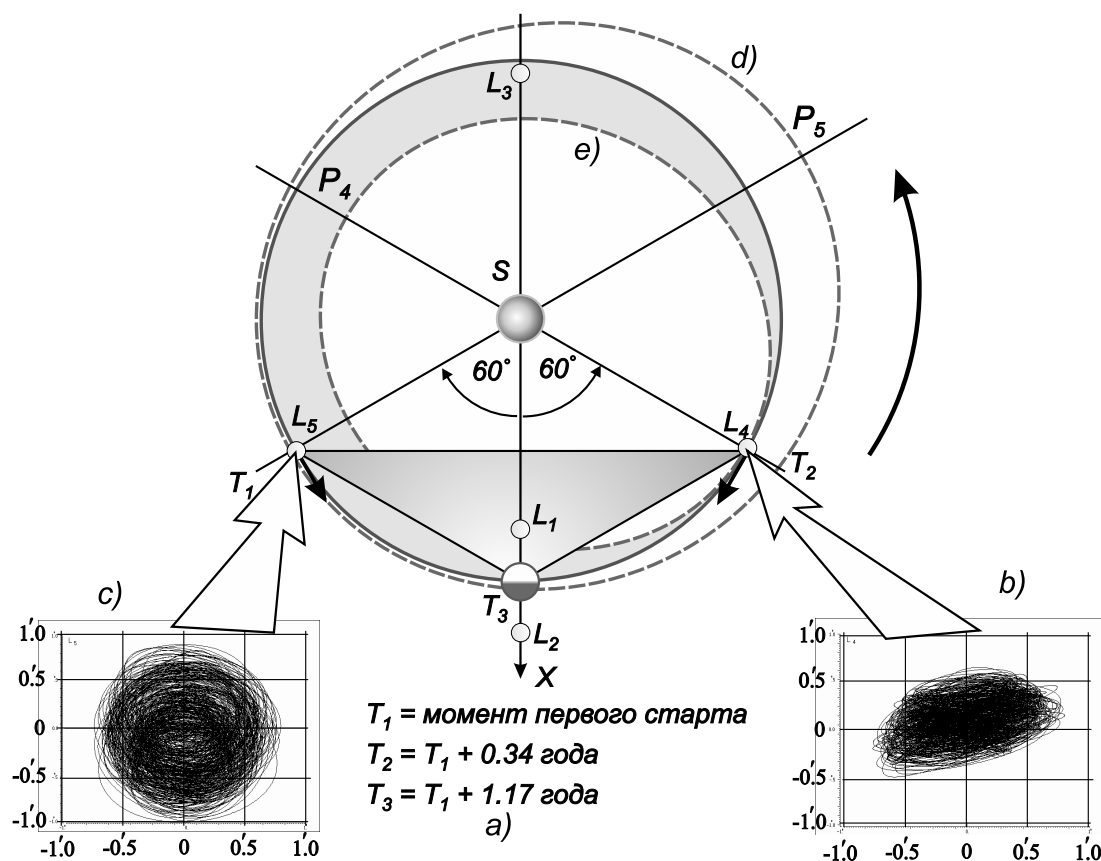


Рис. 1

(e); а) — приблизительная последовательность событий развертывания. Увеличенное изображение окрестностей центров L_4 , L_5 и локальные либрационные движения КА в течение 160 лет показаны во врезках b) и c). Диаметр каждой из этих областей ограничен величиной ~ 65000 км и составляет $2,5 \cdot 10^{-4}$ часть базы В ($\sim 0,025\%$).

1. Естественнонаучные и научно-технические основания проекта

Привлекательность идеи создания ОЗСО состоит в том, что:

- 1) радиационные и температурные условия работы аппаратуры в окрестностях L_4 , L_5 не жестче, чем на околоземных орбитах;
- 2) удобство точек L_4 , L_5 обусловлено устойчивостью либрационного движения в их окрестностях и отсутствием «слепых» засолнечных участков орбит практически всех классов объектов, сближающихся с Землей (ОСЗ), вне пределов сферы радиусом 0,5 а.е.

с центром в Солнце, — зоны избегания засветок от Солнца;

3) база стерео L_4L_5 , равная $B = a\sqrt{3} \cong \cong 259,111$ млн. км, где a — средний радиус орбиты Земли (рис. 1), эффективна и оптимальна по размеру для решения задач астрономии и астероидно-кометной опасности (АКО). База также эффективна для определений «мгновенных» параллаксов звезд, что предлагается сделать впервые и придает проекту оригинальность;

4) в дополнение синхронный обзор всего (или избранных областей) неба двумя астрографами ОЗСО, снабженными системой светофильтров, позволяет получить достаточно точное распределение энергии в излучении всех регистрируемых объектов — в каждой серии кадров области съемки.

Заметим также, что после исчерпания ресурса космические аппараты не будут источником загрязнения околоземного пространства.

Научный и технологический потенциалы развития идеи создания орбитальной стерео-обсерватории велики и весьма интересны.

2. Концептуальная научная программа ОЗСО

Научная программа ОЗСО учитывает существующие актуальные задачи современной астрономии: 1) задачи небесной механики, в частности задачи АКО и 2) задачи изучения фундаментальных свойств планетной системы Солнца и других объектов близкой к Солнцу части Галактики. Мы здесь разделяем точку зрения Международного Астрономического Союза: фундаментальное изучение Солнечной системы на базе новых технологий, развитых к началу XXI в. — проблема назревшая. Она обозначена астрономическим сообществом как одна из наиболее актуальных [5]. В программе ОЗСО этот акцент является важным мотивом развития проекта. Программа включает задачи, для решения которых метод синхронной триангуляции имеет преимущество трехмерности. Нет ограничений и для наблюдений в режиме одиночного телескопа за пределами зоны избегания засветок от Солнца.

Таким образом, в главном мы осуществляем **Комбинированный Орбитальный Стереоскопический Мониторинг Объектов Солнечной Системы**. Аббревиация названия этого процесса может составить название проекта: (КОСМОСС, COSMOSS).

3. Трехзеркальный астрограф ОЗСО

При выборе инструмента мы ориентировались на стандарты, сформированные в работах над проектами орбитального телескопа HUBBLE [6], телескопов «Спектр-УФ» [7], GAIA [8], SNAP [9], JASMINE [10], OBSS [11] и др. Система наведения и управления экспозицией телескопа HUBBLE блестяще зарекомендовала метод точечного наведения и удержания направления в течение времени экспозиции. В отечественном проекте «Спектр-УФ» [7] эта система наведения также разработана. Ее аналог планируется к использованию в проекте ОЗСО с соответствующей адаптацией.

Трехзеркальная система с апертурой 2 м разрабатывается в проектах [9–11] и обретает статус перспективной. Нами исследованы свыше 40 вариантов системы с промежуточным действительным изображением после отражения от двух зеркал: диаметр главного зеркала $D = 1000$ мм, угловое поле зрения — $2\omega = 40', 1^\circ$. Рассмотрены только цен-

трированные системы, работающие полным полем [12, 13]. На рис. 2 для полноты описания представлен вариант с эквивалентным фокусным расстоянием $f' = 30$ м.

Данная компоновка занимает объем $130 \times 150 \times 400$ см³. Мозаикой ПЗС-матриц покрыто линейное поле зрения F диаметром $d = 350$ мм.

4. Система регистрации изображений

Возможны две стратегии набора ПЗС-матриц в мозаику [14]: а) много отдельных матриц небольшого формата (рис. 4); б) меньшее количество крупноформатных матриц (рис. 5).

Преимущества стратегии а): 1) чтение данных с маленькой матрицы происходит значительно быстрее, чем с большой; 2) в случае производственного дефекта выйдет из строя только один блок, т.е. покрытие фокальной плоскости большим числом малых матриц уменьшает шанс выхода из строя всего устройства; 3) производство ПЗС матрицы небольшого размера обходится дешевле, выход годных матриц выше; 4) «разлив» заряда от ярких звезд искажает отсчет в меньшей угловой площади.

При стратегии б) меньше «слепых» пространств. Матрицы A, B, C, D (рис. 3, 4) предназначаются для функций гидирования и удержания на время экспозиции. Заполнение наблюдениями «слепых» промежутков мозаики производится методом съемки со смещением точки наводки по диагонали. Второй снимок необходим и для исключения следов частиц. Пиксел — квадрат со стороной 10 мк.

При использовании аппроксимации функцией рассеяния точки (ФРТ) положение фотоцентра изображения точечного источника определяется с точностью на уровне 0,01 пиксела, зависит от отношения сигнала к шуму (ОСШ) исследуемого объекта, а ошибка одиночного измерения для нашего случая заключена в пределах $0,00062'' \geq |\sigma_1| \geq 0,00012''$.

5. Основные подходы к решению задач научной программы

5.1. Задачи АКО

Основной метод наблюдения тел Солнечной системы (рис. 5) — построение «вее-

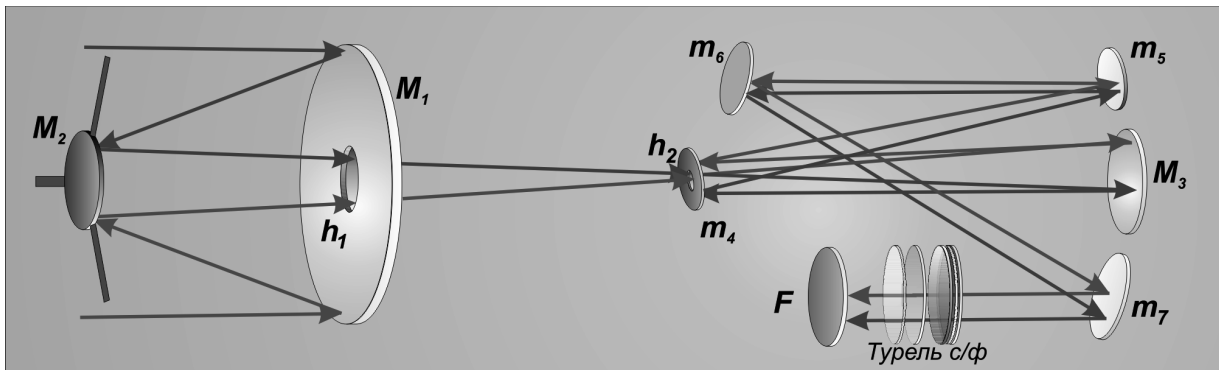


Рис. 2

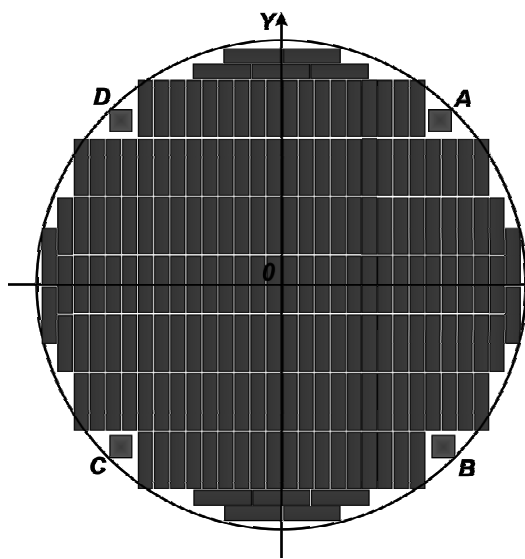


Рис. 3

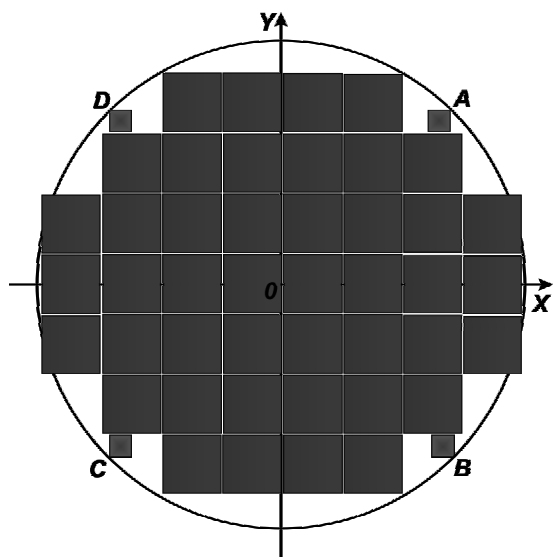


Рис. 4

ра» барицентрических векторов $\mathbf{R}(t_i)$ объекта в точках орбиты p_i , уравнивание по методу наименьших квадратов избыточной системы уравнений с выводом величин радиус-вектора $\mathbf{R}(t_0) = \{R_x, R_y, R_z\}$ и скорости $\mathbf{V}(t_0) = \{V_x, V_y, V_z\}$ на средний момент серии t_0 ; шесть их проекций определяют эллиптическую орбиту объекта.

Соответствующая система уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} \mathbf{R}(t_i) = \mathbf{R}(t_0) + \mathbf{V}(t_i - t_0) + \delta\mathbf{R}_i, \\ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta\mathbf{R}_i = \mathbf{0}, i = 1, 2, \dots, n. \end{cases}$$

Синхронное триангуляционное наблюдение объектов в околоземном пространстве представляет наибольший интерес для решения задач АКО. В ряде предлагаемых проектов контролируется сфера радиусом 0,5 а.е. с Землёю в центре (рис. 7) с подлетным вре-

менем в 30 сут. Пересечение на Земле конусов лучей обоих телескопов ОЗСО с раствором угла в 1° формирует сферу вокруг Земли диаметром 0,017 а.е. = 2,618 млн. км = $\mathbf{D}$ (рис. 6). Величина $\mathbf{D}$ лишь немного меньше расстояния между центрами $\mathbf{L}_1, \mathbf{L}_2$. Затрачивая в среднем 4 минуты на глубокий снимок (360 снимков в сутки), каждый из инструментов ОЗСО, контролируя ту же сферу в 0,5 а.е. или телесный угол пространства размером $60^\circ \times 60^\circ$, затратит 10 сут.

Поскольку — в силу многочисленности и трудности их обнаружения на дальних дистанциях, особенно на траекториях со стороны Солнца, наибольшую угрозу представляют тела размерами в 50–100 м [15], то для оценки эффективности ОЗСО при их детектировании имеет значение проникающая сила телескопов или их предельная звездная величина m .

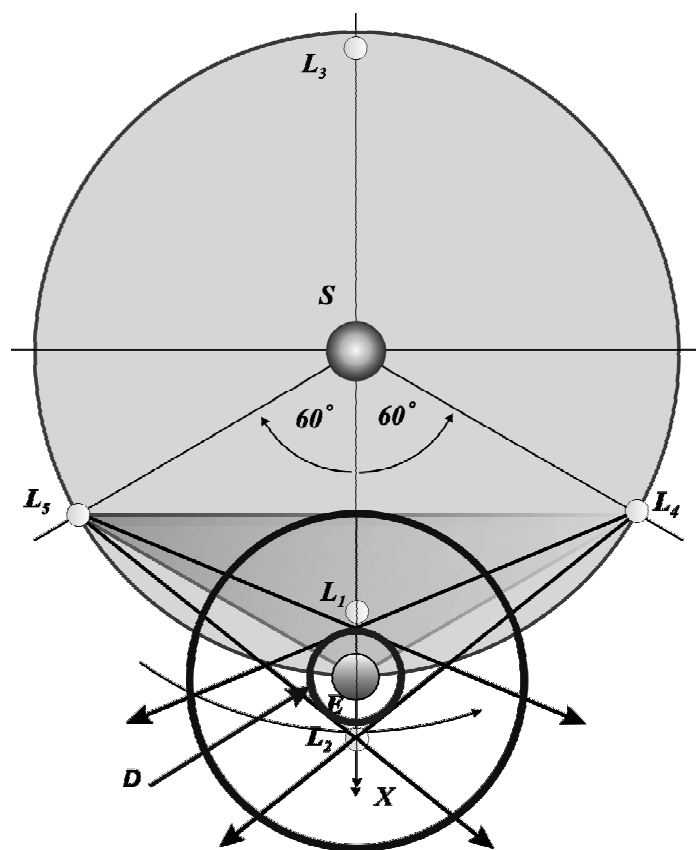


Рис. 6

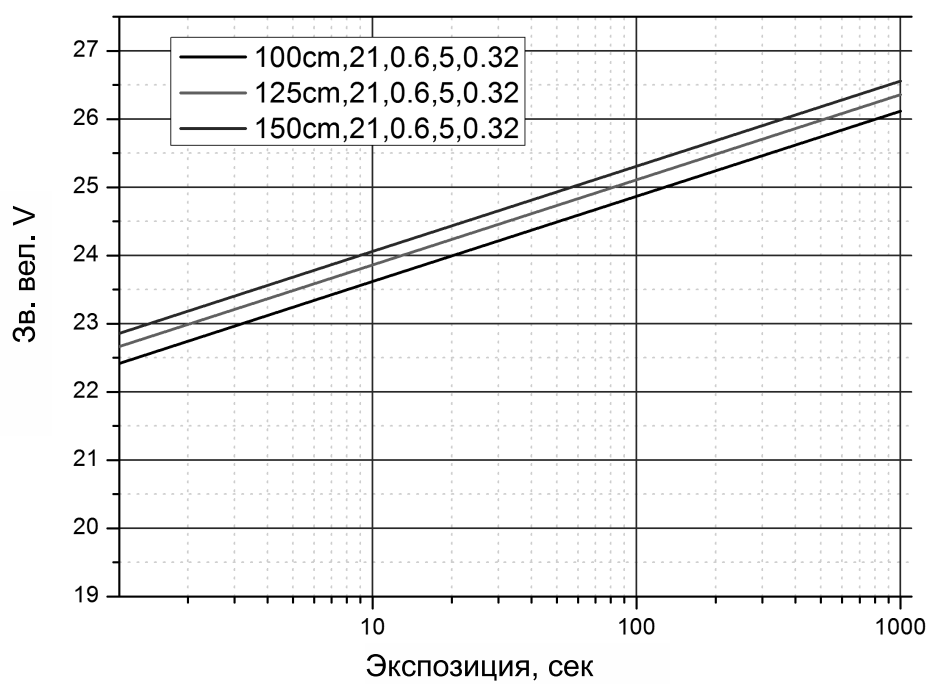


Рис. 7

ИКИ РАН, ИПМ РАН, САО РАН, СПбГУ, СПбГТУИТМО, НИИ ТВ, НИИ ЭЛЕКТРОН, ЛОМО, ГОИ, НПО им. С. А. Лавочкина, ОАО ИСС им. М. Ф. Решетнева и др. Проект может поставить ряд актуальных задач для кооперации с национальными и международными проектами.

Литература

1. Чубей М. С. Межпланетная Стереоскопическая Обсерватория: астрономическая часть научной программы и компоновки // Труды Всероссийской астрометрической конференции «Пулково-2009». Известия ГАО РАН. 2010. № 219. Вып. 4. С. 361–368.
2. Григорьев В. М., Папушев П. Г., Чупраков С. А., Чубей М. С., Кулагин Е. С., Ерошкин Г. И., Львов В. Н., Толчельникова С. А., Ягудин Л. И. Межпланетная Солнечная Стереоскопическая Обсерватория // Оптический журнал. 2006. Т. 73. № 4. С. 43–48.
3. Euler L. De motu rectilineo trium corporum se mutuo attrahentium // Novi Comm. Ac. Sci. Imp. Petrop. 1767. Vol. 11. P. 144–151.
4. Lagrange J. L. Essais sur le problème des trois corps. Paris, 1772.
5. de Zeeuw T. et al. A Science Vision for European Astronomy. ASTRONET SVWG. DRAFT. December 19, 2006. <http://www.strw.leidenuniv.nl/sciencevision> (дата доступа: 01.10.2013).
6. Hubble Space Telescope. http://en.wikipedia.org/wiki/Hubble_Space_Telescope (дата доступа: 01.10.2013).
7. Шустов Б. М., Боярчук А. А., Мошнев А. А., Сачков М. Е. Проект «Всемирная космическая обсерватория — ультрафиолет» // Сб. мат. Всеросс. конф. 19–20 мая 2008 г., Москва, Россия / Под ред. Б. М. Шустова, М. Е. Сачкова и Е. Ю. Кульпио. — М.: Янус-К, 2008. 344 с., илл. ISBN 978-5-8037-0433-1.
8. GAIA. <http://www.rssd.esa.int/gaia/> (дата доступа: 01.10.2013).
9. SNAP (arXiv:astro-ph/0405232v1 12 May 2004).
10. JASMINE. <http://www.jasmine-galaxy.org/pub/index.html> (дата доступа: 01.10.2013).
11. Grillmair C. J. et al. OBSS. The Origins Billion Star Survey // <http://ad.usno.navy.mil/OBSS/>, 2007 (дата доступа: 01.10.2013).
12. Чубей М. С., Цуканова Г. И., Бахолдин А. В. Специфика расчета оптической системы астрографа для проекта «Межпланетная солнечная стереоскопическая обсерватория» // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 7. С. 37–41.
13. Чубей М. С., Бахолдин А. В., Цуканова Г. И., Пашков В. С. Орбитальный широкоугольный астрограф для получения изображений высокого астрометрического и фотометрического разрешения // Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов: Сб. тр. Второй Всеросс. н.-т. конф. (ИКИ РАН, 13–16 сент. 2010, Россия, Таруса) / Под ред. Г. А. Аванесова. Москва, 2011. С. 174–182.
14. Левко Г. В. Анализ конструктивных особенностей ФПЗС мозаик // «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли»: Материалы VIII научно-технической конференции. М., 2011.
15. Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра / Под ред. Б. М. Шустова, Л. В. Рыхловой. М.: Физматлит, 2010. 383 с.
16. Chubey M. S., Yagudin L. I., Lvov V. N., Tsekmejster S. D., Kouprianov V. V., Eroshkin G. I., Smirnov E. A., Petrov A. V. Solving the ACH problem by means of the Interplanetary Solar Stereoscopic Observatory project // Asteroid-Comet Hazard: Proc. Int. Conf. Saint Petersburg, 2009. P. 203–206.
17. Чубей М. С. О возможности определения геометрических параметров движения линзируемых объектов // Изв. ГАО. 1998. №213. С. 273–278.

Ключевые слова: орбитальные проекты, космический стереоскоп, астероидно-кометная опасность.

Статья поступила 13 ноября 2013 г.

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория, г. Санкт-Петербург, Пулково
 Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, г. Санкт-Петербург
 Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Карачаево-Черкесская республика, пос. Нижний Архыз
 © Чубей М. С., Куприянов В. В., Львов В. Н., Цекмейстер С. Д., Бахолдин А. В., Цуканова Г. И., Маркелов С. В., Левко Г. В., 2013