

УДК 520.25

КОМПЛЕКСЫ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

Молотов И. Е., Воропаев В. А., Юдин А. Н., Иванов Д. Е., Аистов Е. А.,
Боровин Г. К.

OPTICAL COMPLEXES FOR MONITORING OF THE NEAR-EARTH SPACE

Molotov I. E.***, Voropaev V. A.*, Yudin A. N.*, Ivanov D. E.**, Aistov E. A.*, Borovin G. K.*

* Keldysh Institute of Applied Mathematics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

** Small innovation enterprise "KIAM Ballistics-Service", Moscow, Russia

e-mail: im62@mail.ru

Abstract. Interagency International Scientific Optical Network (ISON) represents one of largest systems specializing in observation of space objects. For development of the ISON project, KIAM ordered the 10 series of telescopes with apertures from 19.2 to 65 cm, elaborated the software for telescope control and CCD image processing, and adjusted the methods of GEO surveys.

Using this experience three different optical complexes for near-Earth monitoring were elaborated – EOP-1, EOP-2 and KBT-6x20.

6 observatories (4 EOP-1 and 2 EOP-2) were produced with NPP "Project-Techniques" industry company. Usage of KIAM experience significantly reduced the time of production. Observatories were installed in Kislovodsk, Vyurakan, Blagoveschensk and Nauchny. The perfect observation results that were obtained demonstrate the correctness of applied technical and software solutions – 48 % from 19 million measurements were obtained with these observatories in 2016 that allowed to discover almost 1000 space objects and improve our knowledge on HEO-objects (orbits of 2926 HEO-objects are maintained in KIAM database).

Elaboration of new optical complex KBT-6x20 was started in KIAM to improve the orbits of HEO-objects and to detect LEO-objects. Six 20 cm telescopes form barrier field of view 42×4.5 degree.

Keywords: telescope, observatory, survey, space debris, GEO, HEO, observation automation, image processing.

Введение

Понятие «космический мусор» (КМ) охватывает широкий класс космических объектов (КО) искусственного происхождения, находящихся на околоземных орбитах. При этом количество выработавших ресурс спутников, различных ступеней ракет и фрагментов, сопровождающих каждый запуск, достигло предела, когда оно начинает создавать серьезную

угрозу не только для пилотируемых орбитальных станций и функционирующих космических аппаратов (КА), но и экологии Земли и околоземного космического пространства (ОКП). Дальнейшее освоение ОКП невозможно без знания текущей обстановки, анализа источников и закономерностей эволюции КМ. В тоже время, результаты исследований могут быть использованы не только для созда-

Молотов Игорь Евгеньевич, старший научный сотрудник Института прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН; генеральный директор ООО Малое инновационное предприятие «ИПМ Баллистика-Сервис»; e-mail: im62@mail.ru.

Воропаев Виктор Анатольевич, ведущий инженер Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН; e-mail: voropaev@keldysh.ru.

Юдин Алексей Николаевич, инженер Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН; e-mail: fduchun@gmail.com.

Иванов Дмитрий Евгеньевич, начальник технического отдела ООО Малое инновационное предприятие «ИПМ Баллистика-Сервис»; e-mail: cos@list.ru.

Аистов Евгений Александрович, инженер Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН; e-mail: metalclimber@rambler.ru.

Боровин Геннадий Константинович, д-р физ.-мат. наук, главный научный сотрудник Института прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН; e-mail: borovin@keldysh.ru.

Таблица 1. Сводная таблица с параметрами телескопов, созданных в рамках проекта НСОИ АФН в 2006–2017 гг.

Название	Производитель	Оптич. схема	Апертура/ фокус, мм	Поле, град.	Чип, мм
ВТ-78а	Теребиж / Борисов	Шенкер	192/296	7	36
ТГШ-200	Юдин / Санкович	Гамильтон	200/307	7	36
СРТ-220	Теребиж / Борисов	Слефогт-Рихтер	220/507	4	36
ОРИ-22	Теребиж / Борисов	Гамильтон-Ньютон	220/510	4	36
ГАС-250	Юдин / Санкович	Гамильтон-Ньютон	250/735	2,85	36
ОРИ-25	Теребиж / Борисов	Гамильтон-Ньютон	250/625	3,35	36
САНТЕЛ-400А	Юдин / Санкович	Гамильтон-Ньютон	400/1200	1,75	36
ОРИ-40	Теребиж / Борисов	Гамильтон-Ньютон	400/920	2,25	36
ОРИ-50	Теребиж / Борисов	Гамильтон	500/1160	2,5	50
САНТЕЛ-650А	Юдин / Санкович	Гамильтон	650/1300	2,2	50

ния модели популяции КМ и разработки мер, снижающих засоренность ОКП, но и для совершенствования теорий орбитального движения, уточнения модели геопотенциала Земли, развития теории влияния светового давления на движение орбитальных КО, исследования магнитного поля и вариаций плотности верхней атмосферы Земли. Поэтому создание новых комплексов мониторинга ОКП является актуальной задачей.

Ввиду всё возрастающей важности проблемы космического мусора распоряжением Президиума РАН №10310-142 от 28 февраля 2001 г. ИПМ им. Келдыша РАН было поручено создать Центр сбора, хранения, обработки и анализа научной информации по космическому мусору (ЦСИТО) РАН. И в ИПМ им. М.В. Келдыша были развернуты работы по налаживанию регулярного получения измерительных данных, без которых невозможно решение любых задач связанных с этой проблематикой. Так начался международный проект Научная сеть оптических инструментов для астрометрических и фотометрических наблюдений (НСОИ АФН) [1]. Важным моментом в этой работе стало создание нескольких серий новых оптических телескопов для переоснащения обсерваторий сети.

1. Задел ИПМ им М.В. Келдыша РАН в части создания новых оптических телескопов

На первом этапе проекта НСОИ АФН проводились попытки использования для наблюдений КО телескопов, оставшихся в обсерваториях со времен СССР. Но после начала

регулярных исследований стало очевидным, что устаревшие неавтоматизированные телескопы с небольшими полями зрения и недостаточным прониканием мало подходят для наблюдений даже таких медленных объектов, как на геостационарной орбите (ГСО). Было принято решение заказать новые телескопы, спроектированные специально под наблюдения объектов КМ. Поскольку поддержание каталога высокоорбитальных КО обеспечивается как обзорно-поисковыми наблюдениями, так и работой по целеуказанию (ЦУ), то телескопы разрабатывались под обе эти задачи (параметры телескопов представлены в табл. 1).

На втором этапе основной упор делался на ввод в строй обзорных инструментов. ИПМ им. М.В. Келдыша РАН организовал пробные эксперименты в КрАО и Пулковской обсерватории, которые с малыми телескопами позволили отработать методику «сплошных» обзоров ГСО, перекрывающих всю видимую часть ГСО в широкой полосе 18 градусов.

Подобные обзоры, не только гарантированно детектировали все доступные по блеску КО, но и попутно обнаруживали объекты на высокоэллиптических и геопереходных орбитах. Опытным путем были подобраны длины измерительных дуг (15–30 мин.) по каждому КО, минимально необходимые для поддержания хорошей точности орбит в базе данных, а также для обнаружения новых КО, попавших в несколько «смежных» (разнесенных на 1–2 ночи) обзоров. Было показано, что для полного двойного перекрытия за ночь всей видимой части ГСО необходимо иметь поле зрения телескопа порядка 4×4 градуса. Не менее важным показателем являлась невы-

сокая стоимость создаваемых инструментов (проект НСОИ АФН не имеет целевой финансовой поддержки). Поэтому в первую очередь были заказаны небольшие 22-см телескопы СРТ-220 и ОРИ-22. По мере их установки и введения в строй сформировалась поисково-обзорная подсистема НСОИ АФН [2]. Для наблюдений по ЦУ были заказаны 25-см телескопы ГАС-250 и ОРИ-25, которые вошли в подсистему наблюдений ярких КО по целеуказаниям. Эти работы позволили ЦСИТО РАН в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН впервые составить и поддерживать список орбит геостационарных КО с блеском до 15,5 звездной величины.

Более слабые КО к этому времени обнаруживались старыми модернизированными телескопами (64-см АТ-64 в Научном, КраО; 60-см Цейсс-600 в Архызе, ОАО «НПК «СПП»»; 48-см АЗТ-14 в Мондах, ИСЗФ СО РАН; 1-м Цейсс-1000 в Тейде, Тенерифе, Испания, ЕКА), но для поддержания их точных орбит в базе данных ЦСИТО РАН не хватило телескопов сопровождения. Поэтому были заказаны к разработке сперва 40-см телескопы ОРИ-40 и САНТЕЛ-400А, а затем 50-см ОРИ-50 и 65-см САНТЕЛ-650А.

В ноябре 2012 г. при ЦСИТО РАН в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН был введен в опытную эксплуатацию Сегмент мониторинга опасных ситуаций в области геостационарных, высокоэллиптических и средневысоких орбит Автоматизированной системы предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве (АСПОС ОКП) [3] Роскосмоса. Сегмент должен был осуществлять прогнозирование опасных сближений с российскими спутниками, для чего потребовалось увеличение точностей орбит всех КО в базе данных. С этой целью была разработана методика расширенных обзоров, значительно повышающих количество просмотров ГСО за ночь (с 2-х до 10 раз). При этом существенно увеличивается точность орбит большей части ГСО-объектов (за счет удлинения измерительных дуг до 10–12 ч.), а также обеспечивается возможность более тщательного отслеживания маневров КА в кластерах в точках стояния. Под эту задачу была заказана разработка 19,2-см телескопа ВТ-78а с полем зрения 7×7 градусов и начато создание подсистемы НСОИ АФН для расширенных обзоров ГСО [4].

Тем не менее существующего потока данных (6 млн измерений в год) было недостаточ-

но для качественного решения задач АСПОС ОКП, особенно плохо дело обстояло с перекрытием зоны ГСО над Западным полушарием Земли, с сопровождением слабых фрагментов КО, с обнаружением и сопровождением объектов на высокоэллиптических и средневысоких орбитах. Поэтому была инициирована работа по созданию сети специализированных средств Роскосмоса с использованием накопленного к этому времени задела НСОИ АФН и ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

2. Специализированные обсерватории Роскосмоса ЭОП-1/2

В комплексах первого поколения ЭОП-1 (экспериментальный оптический пункт) [5] было предложено применить сдвоенные 19,2-см телескопы ВТ-78а, чтобы сохранить возможность проведения расширенных обзоров области ГСО при использовании ПЗС-камер на прямоугольном фотоприемнике КАИ-11002М. Электронный затвор в этих камерах позволял дополнительно получать измерения по ВЭО-объектам на быстрых участках их траекторий (до этого треки быстрых объектов, попадавших в обзоры ГСО, не обрабатывались). В итоге было получено суммарное поле зрения 9×7 градусов при повышенной точности измерений (поскольку электронный затвор дает более точную регистрацию времени измерений).

В дополнение, ЭОП-1 был укомплектован 25-см телескопами (ОРИ-25 или ГАС-250) также с ПЗС-камерами с электронными затворами и 40-см телескопами (ОРИ-40 или САНТЕЛ-400А) с турелью и светофильтрами BVRI. Общий вид ЭОП-1 представлен на рис. 1.

25-см телескопы предназначались для уточнения орбит КО, участвующих в опасных сближениях, а также оперативного подхвата новых КО, обнаруживаемых обзорами телескопа 2хВТ-78а. 40-см телескоп должен был участвовать в сопровождении слабых фрагментов космического мусора, обнаруживаемых средними телескопами сети НСОИ АФН, а также, в случае необходимости, получать фотометрию по аварийным КА. Телескопы было предложено размещать в павильонах со сдвижными крышами, также рядом должен располагаться отдельный павильон для компьютеров и наблюдателей. Всего было произведено (с помощью промышленной компании Научно-производственное объединение «Проект-техника») четыре обсервато-



Рис. 1. Специализированная обсерватория Роскосмоса в Кисловодске для мониторинга космического мусора. Слева – направо: ОРИ-25, двойной ВТ-78а и САНТЕЛ-400А телескопы

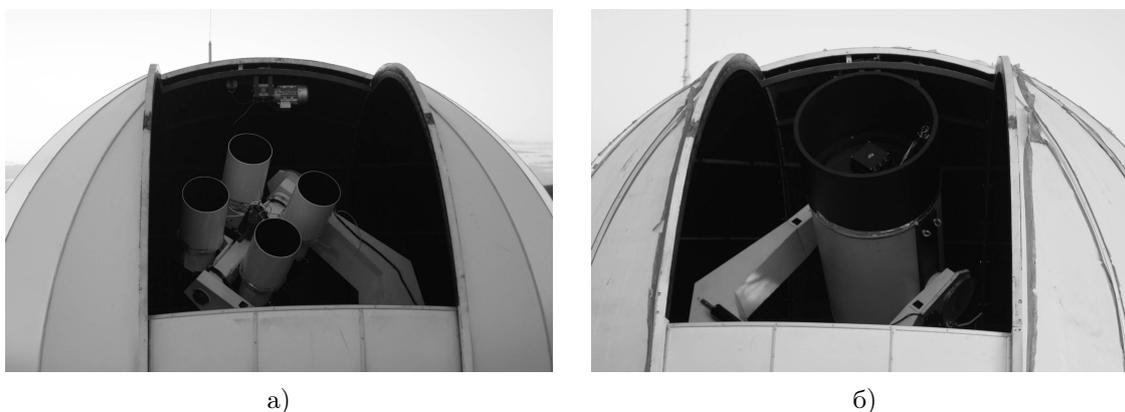


Рис. 2. Средства 4xВТ-78а и САНТЕЛ-650А из состава специализированной обсерватории ЭОП-2 в Кисловодске

рии ЭОП-1, установленных по рекомендации ИПМ им. М.В. Келдыша РАН в Кисловодске, Бюракане и Научном в Крыму (2 комплекта).

В комплексах второго поколения ЭОП-2 была предпринята попытка создать инструменты для еще более скоростного обзора, объединив в одно средство уже 4 телескопа ВТ-78а, а также включив в комплект новый 65-см телескоп САНТЕЛ-650А и 40-см телескоп ОРИ-40. Телескопы 4xВТ-78а и САНТЕЛ-650А представлены на рис. 2, а общий вид специализированной обсерватории ЭОП-2 показан на рис. 3.

Телескоп 4xВТ-78а с суммарным полем зрения 9×14 градусов предназначался для скоростного обзора высокоэллиптических орбит, а телескоп САНТЕЛ-650А с полем зрения $2,2 \times 2,2$ градуса — для локальных глубоких обзоров в интересах обнаружения некаталогизированных слабых фрагментов космического мусора, образовавшихся при разрушениях КО. Телескоп ОРИ-40 был включен в комплекс для аналогичных задач, как и в

ЭОП-1 — сопровождение слабых КО и фотометрия КА. В этой серии обсерваторий телескопы устанавливались во вращающиеся купола. Всего изготовлено две обсерватории ЭОП-2, которые были размещены в Кисловодске и Благовещенске.

В обоих типах обсерваторий для управления телескопами и обработки ПЗС-кадров использовалось типовое программное обеспечение НСОИ АФН-ФОРТЕ [6].

Пробная эксплуатация (которая проводилась с помощью специальной эксплуатирующей организации по договору с Роскосмосом в рамках ОКР «АСПОС ОКП») шести обсерваторий ЭОП-1/2 продемонстрировала высокую эффективность предложенных решений — по суммарной производительности за 2016 г. они получили 48 % процентов от 19 млн. измерений межведомственной сети мониторинга ОКП. Как и планировалось, 6 обзорных средств (2xВТ-78а и 4xВТ-78а) внесли существенный вклад в поддержание каталога ВЭО-объектов, что позволило довести их



Рис. 3. Специализированная обсерватория Роскосмоса в Благовещенске для мониторинга космического мусора

количество в базе данных ЦСИТО РАН до 2926. Телескопы САНТЕЛ-650А, ОРИ-40 и САНТЕЛ-400А значительно повысили число обнаружений новых КО и снизили процент их потерь. В 2016 г. было обнаружено 550 новых КО и переобнаружено 480 ранее потерянных КО (для сравнения в 2015 г. — 339 и 307, соответственно). Сейчас в ЦСИТО РАН поддерживаются орбиты 2277 ГСО-объектов.

3. Проект барьерного телескопа КБТ-6х20

В рамках дальнейшего развития средств мониторинга ОКП было предложено обнаруживать новые ВЭО-объекты и уточнять орбиты уже каталогизированных по их наблюдениям в перигейной области. Что потребовало создания концепции т.н. барьерного телескопа, реализующего вытянутое суммарное поле зрения, перекрывающего большую часть из возможных орбит. В дополнение подобный оптический комплекс способен детектировать и низкоорбитальные объекты. Новая система планировалась как кластер из 20 телескопов с целью формирования двух разнесенных по углу барьеров — для обнаружения новых объектов и последующего уточнения их орбит. Но из-за финансовых ограничений проект сократился до демонстрационного макета барьерного комплекса из 6-ти телескопов 20-см апертуры. Общий вид телескопа КБТ-6х20 в раскрывающемся контейнере представлен на рис. 4. Для КБТ-6х20 был разработан новый 20-см телескоп с оптическим полем зрения 7×7 градусов, предусматривающий установку ПЗС-камеры в первичном фокусе

с использованием оригинального фокусирующего устройства в форме кольца, опирающегося на стенки трубы телескопа. Суммарное поле зрения барьерного комплекса, который сейчас проходит испытания в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН в Москве, составило $42 \times 4,5$ градуса для ПЗС-камер т.н. «технического зрения» на прямоугольном фотоприемнике КАИ-11002М. Подобная камера обеспечивает считывание ПЗС-кадра до 6 раз в секунду, что позволяет не только детектировать самые быстрые из КО, но и получать по ним быструю фотометрию.

На основе этой серии телескопов в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН проектируются новые системы панорамного обзора небесной сферы, в частности, один из проектов обеспечивает суммарное поле зрения уже 1058 кв. град. (23×46 град.). Это 8-элементная кластерная система из 18-см телескопов с полем зрения $11,5 \times 11,5$ град, специализированная под обнаружение высокоэллиптических и низкоорбитальных КО.

Заключение

В рамках развития сети НСОИ АФН ИПМ им. М.В. Келдыша РАН заказал разработку десяти типов оптических телескопов апертурой от 19,2 см до 65 см, а также нескольких типов опорно-поворотных устройств, павильонов и куполов. С использованием этого задела было разработано 3 серии оптико-электронных комплексов мониторинга ОКП — ЭОП-1, ЭОП-2 и КБТ-6х20. Использование наработок проекта НСОИ АФН в части телескопов, опорно-поворотных



Рис. 4. Общий вид барьерного комплекса КБТ-6х20 из шести телескопов ТГШ-200 на испытаниях в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН в Москве

устройств, куполов и программного обеспечения позволило НПП «Проект-Техника» в несколько раз сократить сроки создания ЭОП-1/2.

Работа ЭОП-1/2, которая обеспечивается специальной эксплуатирующей организацией, позволила существенно пополнить каталог ГСО и ВЭО объектов, а также повысить точность орбит для прогнозов опасных сближений. В 2016 г. их вклад в общий измерительный поток достигал уже 48 %.

С целью получения данных по низкоорбитальным и высокоэллиптическим КО в перигее, начата разработка серии барьерных кластерных телескопов и систем панорамного обзора (> 1000 кв. град.). Первый из которых, КБТ-6х20 из шести 20-см телескопов с общим полем $4,5 \times 42$ градуса, проходит испытания в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН Москве.

Литература

1. Молотов И.Е., Агапов В.М., Куприянов В.В. и др. Научная сеть оптических инструментов для астрометрических и фотометрических наблюдений // Известия Главной астрономической обсерватории в Пулкове. 2009. № 219. Вып. 1. С. 233–248.
2. Молотов И.Е., Агапов В.М., Ибрагимов М.А. и др. Глобальная система мониторинга геостационарной орбиты // Материалы международной конференции. Околосемная астрономия-2007. 2008. С. 309-314.
3. Шилин В.Д., Лукьянов А.П., Молотов И.Е., Агапов В.М., Колесса А.Е. Проблемы преду-

ждения об опасных ситуациях в околосемном космическом пространстве. Планы и возможности. Роль оптических наблюдений // Международный научный журнал Экологический вестник научных центров экологического сотрудничества. 2013. № 4. Т. 2. С. 171–175.

4. Molotov I., Zolotov V., Fakhrutdinov T., et al. New subsystem of the ISON optical network to improve the conjunction analysis // Proc. 66th International Astronautical Congress. 2015. IAC-15,A6,1,1,x29417.
5. Molotov I., Agapov V., Makarov Yu., Kouprianov V., Lapshin A., Chestnov D., Zolotov V., Nevski V. EOP-1/EOP-2 mini-observatories for space debris observations: characteristics, tasks and first results of operation // Proc. the 65th International Astronautical Congress. 2014. IAC-14,A6,1,4,x23058.
6. Kouprianov V., Molotov I. FORTE: ISON robotic telescope control software // Proc. 7th European Conference on Space Debris. 2017. P. 9.

References

1. Molotov I.E., Agapov V.M., Kouprianov V.V. et al. Nauchnaya set' opticheskikh instrumentov dlya astrometricheskikh i fotometricheskikh nablyudeniya [Scientific network of optical instruments for astrometric and photometric observations]. *Izvestiya Glavnoy astronomicheskoy obsekvatorii v Pulkove* [Transactions of the Central Astronomical Observatory at Pulkovo], 2009, no. 219, iss. 1, pp. 233–248. (In Russian).
2. Molotov I.E., Agapov V.M., Ibragimov M.A. et al. Global system for monitoring of Geostationary orbit. *Materials of international conference*

- Near-Earth Astronomy*, 2008, pp. 309–314. (In Russian)
3. Shilin V.D., Lukianov A.P., Molotov I.E. et al. Problems of warning about dangerous situations in the near-Earth space. Plans and possibilities. Role of optical observations. *Ecological bulletin of scientific centers of ecological collaboration*, 2013, no. 4. iss. 2, pp. 171–175. (In Russian)
 4. Molotov I., Zolotov V., Fakhruddinov T., et al. New subsystem of the ISON optical network to improve the conjunction analysis. In: *Proc. 66th International Astronautical Congress*, 2015, IAC-15,A6,1,1,x29417. doi: 10.7892/boris.97496
 5. Molotov I., Agapov V., Makarov Yu., Kouprianov V., Lapshin A., Chestnov D., Zolotov V., Nevski V. EOP-1/EOP-2 mini-observatories for space debris observations: characteristics, tasks and first results of operation. In: *Proc. the 65th International Astronautical Congress*, 2014, IAC-14,A6,1,4,x23058.
 6. Kouprianov V., Molotov I. FORTE: ISON robotic telescope control software. In: *Proc. 7th European Conference on Space Debris*, 2017, p. 9.

© Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества, 2017

© Молотов И. Е., Воропаев В. А., Юдин А. Н., Иванов Д. Е., Аистов Е. А., Боровин Г. К., 2017

Статья поступила 2 ноября 2017 г.