ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 274 за 2018 г.

ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

Молотов И.Е., Еленин Л.В.,
Усовик И.В., Крылов А.Н.,
Гриб А.Г., Сибиченкова М.А.,
Капралов М.А.

Анализ вклада сети НСОИ
АФН в решение задач
мониторинга космического
мусора в области
геостационарных орбит

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Анализ вклада сети НСОИ АФН в решение задач мониторинга космического мусора в области геостационарных орбит / И.Е.Молотов [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2018. № 274. 14 с.
doi:[10.20948/prepr-2018-274](https://doi.org/10.20948/prepr-2018-274)
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2018-274>

О р д е н а Л е н и н а
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Р о с с и й с к о й а к а д е м и и н а у к

**И.Е. Молотов, Л.В. Еленин, И.В. Усовик, А.Н. Крылов,
А.Г. Гриб, М.А. Сибиченкова, М.А. Капралов**

**Анализ вклада сети НСОИ АФН
в решение задач мониторинга
космического мусора в области
геостационарных орбит**

Москва — 2018

Молотов И.Е., Еленин Л.В., Усовик И.В., Крылов А.Н., Гриб А.Г., Сибиченкова М.А., Капралов М.А.

Анализ вклада сети НСОИ АФН в решение задач мониторинга космического мусора в области геостационарных орбит.

В статье описано текущее состояние Научной сети оптических инструментов для астрометрических и фотометрических наблюдений (НСОИ АФН). Приведен анализ результатов наблюдений сети НСОИ АФН в 2017 г., включая сравнение с данными других российских наблюдательных коопераций. Показано, что сеть НСОИ АФН продолжает вносить определяющий вклад в задачу поддержания каталога точных орбит крупных ГСО-объектов.

Ключевые слова: космический мусор, база данных, каталог космических объектов, геостационарная орбита, оптический телескоп, поле зрения, сеть обсерваторий, астрометрические измерения, планирование обзорных наблюдений.

Molotov I.E., Elenin L.V., Usovik I.V., Krylov A.N., Grib A.G., Sibitchenkova M.A., Kapralov M.A.

Analysis of the contribution of the ISON network in solving problems of monitoring space debris on geosynchronous orbits.

The article describes the current state of the scientific network of optical instruments for astrometric and photometric observations. The analysis of results of observational network in 2017, including the comparison with other Russian observing cooperation, is given. We demonstrate that the ISON network continues to make a notable contribution to the task of maintaining the catalog of the precise orbits of large GEO-objects.

Key words: space debris, database, catalogue of space objects, geostationary orbit, optical telescope, field of view, observatory network, astrometric measurements, planning of survey observations.

Работа была частично поддержана грантом РФФИ №17-51-44018.

Оглавление

Введение	3
Текущее состояние сети НСОИ АФН	3
Анализ результатов, полученных НСОИ АФН в 2017 г.	7
Библиографический список	133

Введение

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 для экологии Земли и околоземного космического пространства (ОКП). Дальнейшее освоение ОКП невозможно без знания текущей обстановки, анализа источников и закономерностей эволюции популяции космического мусора (КМ). Данные о КМ необходимы для создания модели популяции КМ и разработки мер, снижающих засоренность ОКП.

Ввиду всё возрастающей важности проблемы космического мусора распоряжением Президиума РАН №10310-142 от 28 февраля 2001 г. ИПМ им. М.В. Келдыша РАН было поручено создать Центр сбора, хранения, обработки и анализа научной информации по космическому мусору (ЦСИТО) РАН [1]. Для его информационного наполнения ИПМ им. М.В. Келдыша были развернуты работы по налаживанию регулярного получения измерительных данных. Это послужило началом международного проекта Научная сеть оптических инструментов для астрометрических и фотометрических измерений (НСОИ АФН) [2].

В рамках проекта НСОИ ФН были разработаны большинство типов российских телескопов [3], применяемых для мониторинга ОКП, специализированного программного обеспечения для обработки ПЗС-кадров, управления телескопами [4] и планирования наблюдений. Также были отработаны основные типы обзоров геостационарной орбиты (ГСО): полные, расширенные и локальные на телескопах с полями зрения от 2,5 до 7 градусов [5]. С использованием накопленного задела ИПМ им. М.В. Келдыша РАН были сформированы подсистемы специализированных средств Роскосмоса [6] и организаций промышленности [7], что позволило сети НСОИ АФН длительное время обеспечивать до 90% данных Российской Федерации по космическим объектам на высоких орбитах. Однако после выделения этих подсистем в независимые сегменты со своими центрами планирования и обработки данных параметры НСОИ АФН существенно снизились, в связи с чем актуально провести оценку текущего вклада сети НСОИ АФН в решение задач мониторинга космического мусора в области ГСО.

Текущее состояние сети НСОИ АФН

Наибольший результат продолжает вносить глобальная обзорно-поисковая подсистема, основы которой были заложены в 2007 г. [8]. Данная подсистема, состоящая из 12 телескопов с полями зрения от 3,4 до 7 градусов, до сих пор остается единственной, которая перекрывает обзорными наблюдениями всю геостационарную орбиту. На Рис. 1 показаны 22-см ОРИ-22 с ПЗС-камерой FLI

PL4301E (поле зрения $5,5^\circ$) на автоматизированной монтировке EQ6Pro в Китабе, Узбекистан (слева) и 25-см ORI-25 с ПЗС-камерой FLI ML09000 (поле зрения $3,4^\circ$) на автоматизированной монтировке EQ6Pro в Тарихе, Боливия (справа).

Рис. 1. Типовые широкоугольные телескопы НСОИ АФН

На сегодня подсистема включает в себя пять 22-см телескопов ORI-22 (оптической схемы Гамильтон-Ньютон с фокусным расстоянием 510 мм) в Уссурийске (Дальний Восток), Китабе (Узбекистан), Абастумани (Грузия), Андрушевке (Украина), Кастельгранде (Италия), пять 25-см телескопов ORI-25 (системы Гамильтон-Ньютон с фокусным расстоянием 625 мм) в Урумчи (Китай), Чугуеве (Украина), Монтерее (Мексика), Тарихе (Боливия), Косале (Мексика), а также 20-см телескоп ASA в Циммервальде (Швейцария) и 50-см телескоп TFRM в Барселоне (Испания). Каждую наблюдательную ночь они в автоматическом режиме дважды просматривают всю видимую часть ГСО в широкой полосе 18 градусов и гарантированно детектируют все космические объекты (КО) с блеском до $15,5^m$. Опытным путем были подобраны длины измерительных дуг (15–30 минут) 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.

Принцип планирования обзоров представлен на рис. 2, где показаны траектории всех известных геостационарных объектов, а также положение всех известных геостационарных КО. Область на уровне 16 часов по оси прямого восхождения – тень Земли. Прямоугольники – поля зрения телескопов, формирующие барьеры, которые просматривает обзорный телескоп за ночь.

Во время проведения обзора телескоп должен пройти все траектории дважды. Барьеры для обзоров выбираются спереди и позади тени Земли, в области, где ГСО-объекты становятся ярче из-за благоприятного фазового угла.

За каждый подобный «проход» телескоп делает 10 кадров каждой области обзорной мозаики. Данное число кадров подобрано также эмпирически, на основе полученного опыта и позволяет уверенно детектировать КО даже в плотных звездных полях, где на части кадров КО «сливаются» с треками от звезд фона.

Рис. 2. Планирование барьеров для стандартных обзорных наблюдений ГСО

За полную ночь каждый обзорный телескоп получает несколько тысяч астрометрических измерений по нескольким сотням ГСО-объектов, а в сумме обзорные наблюдения подсистемы позволяют контролировать обстановку на протяжении всей ГСО, в том числе обнаруживая объекты новых запусков и объекты на высокоэллиптических орбитах (ВЭО), пересекающих область ГСО. Именно за счет измерений, получаемых глобальной подсистемой, в ЦСИТО РАН в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН поддерживается каталог (список орбит) геостационарных КО с блеском до $15,5^m$.

Глобальную поисково-обзорную подсистему дополняют четыре 19,2-см телескопа ВТ-78а (оптической схемы Шмидта-Хутона с фокусным расстоянием 296 мм, (рис. 3) с полем зрения 7° , установленные в Уссурийске (Дальний Восток), Хуралтоготе (Монголия), Мульте (республика Алтай) и Тирасполе (Приднестровская Молдавская республика). Телескопы были введены в строй после 2012 г., когда 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) [9] Роскосмоса. Сегмент осуществляет 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 ГСО (рис. 4), значительно повышающая количество просмотров ГСО за ночь (с 2 до 10 раз) при использовании телескопов с большим полем зрения (от 7° и более).

Рис. 3. 20-см телескоп ASA в Циммервальде и типовой 19,2-см сверхширокоугольный телескоп VT-78a

За полную ночь каждый телескоп для расширенных обзоров получает до 15 тысяч астрометрических измерений по 500–700 КО с блеском до $14,5^m$. При этом существенно увеличивается точность орбит большей части ярких ГСО-объектов (за счет удлинения измерительных дуг до 10–12 часов), а также обеспечивается возможность более тщательного отслеживания маневров КА в кластерах в точках стояния и повышается вероятность детектирования ВЭО-объектов.

Рис. 4. Планирование барьеров для расширенных обзоров ГСО

Помимо обзорных телескопов в НСОИ АФН включены телескопы для наблюдений ярких (до $15,5^m$) и слабых (слабее $15,5^m$) КО по целеуказаниям (ЦУ), задачей которых является отслеживание КО, не попадающих в обзоры, и уточнение орбит пар КО, участвующих в опасных сближениях. Подсистема сопровождения по ЦУ ярких КО включает в пять 25-см телескопов – ГАС-250 в Уссурийске (Дальний Восток), ВРС-250 в Ужгороде (Украина), ОРИ-25 в Тирасполе (Приднестровская Молдавская республика), а также новые телескопы с малым полем зрения (для получения высокоточных измерений по сближающимся КО) ТАЛ-250 (рис. 5) в Барнауле (Алтайский край), ТАЛ-250К в Косале (Мексика).

Подсистема наблюдений слабых КО включает в себя 8 телескопов – 40-см телескоп ОРИ-40 в Хуралтоготе (Монголия), 36-см телескоп РК-360 в Китабе (Узбекистан), 80-см телескоп К-800 на Терсколе (Кабардино-Балкария), 64-см телескоп АТ-64 и 40-см телескоп новой серии ДИН-400 (для получения высокоточных измерений по сближающимся слабым КО) в Научном (Крым), 50-см телескоп ОРИ-50 в Андрушевке (Украине), 40-см телескоп ЧВ-400 в Ужгороде (Украина) и 50-см CDK20 в Циммервальде (Швейцария).

Рис. 5. Телескопы НСОИ АФН для наблюдения по ЦУ – 25-см телескоп ТАЛ-250К и 40-см телескоп ДИН-400

В дополнение, данные 80-см телескопа К-800 на Терсколе используются для верификации создаваемой модели популяции космического мусора на высоких орбитах (ВЭО) [10].

Анализ результатов, полученных НСОИ АФН в 2017 г.

В течение 2017 г. ЦСИТО РАН было получено 22,689 миллионов астрометрических измерений. Вклад различных российских сегментов в наполнение ЦСИТО РАН оптическими измерениями по КО показан на рис. 6. Совокупный вклад НСОИ АФН составляет 28%, т.е. 6,353 млн измерений. На

рис. 7 показан вклад сегментов в обнаружение новых КО и в уточнение орбит КО, находящихся на грани потери (рассчитан по методике ПАО «МАК «Вымел» [11]). Суммарный вклад НСОИ АФН составляет 13,89%. Из сопоставления рис. 6 и рис. 7 следует вывод, что работа НСОИ АФН больше направлена на поддержание каталога КО, чем на обнаружение новых КО.

На рис. 8 [11] показано изменение числа измеренных (периодически наблюдаемых) и контролируемых (с относительно точными орбитами) ГСО-объектов с блеском до $15,5^m$ по месяцам 2016 и 2017 гг. Видно, что каталог ярких КО на ГСО поддерживается устойчиво на протяжении всего времени, фактически это ровная линия, равномерно повышающаяся, что указывает на небольшой прирост количества ярких ГСО-объектов. При этом разница между количеством измеренных КО и количеством контролируемых, т.е. КО с точными орбитами, практически отсутствует – на конец 2017 г. контролировалось ~98% ярких измеренных КО на ГСО. Вклад различных сегментов в наблюдения ярких контролируемых КО на ГСО продемонстрирован на рис. 9 [1]. Фактически это означает вклад сегментов в поддержание точных орбит ярких КО на ГСО в каталоге. Очевидно, что наибольший вклад в контролируемые яркие ГСО-объекты дают телескопы НСОИ АФН, эксплуатируемые ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Количество ярких КО с точными орбитами по данным ИПМ/НСОИ АФН стабильно на всем протяжении и находится на уровне 93% (1300 КО на конец 2017 г.).

Рис. 6. Эффективность вклада различных сегментов в наполнение ЦСИТО РАН оптическими измерениями по КО

Рис. 7. Эффективность вклада различных сегментов в поддержание каталога КО в 2017 г. по методике ПАО "МАК "Вымпел"

Рис. 8. Количество измеренных (синий цвет) и контролируемых (красный цвет) ГСО-объектов с блеском до $15,5^m$ в базе данных по месяцам за 2015-2017 гг.

Количество же ярких КО с точным орбитами по данным наблюдательных сегментов Роскосмоса и АО АНЦ существенно переменнo и регулярно опускается на уровень более 50% популяции (достигает 700 КО из 1300). Отсюда следует, что исключение средств ИПМ/НСОИ АФН приведет к значительному ухудшению показателей системы АСПОС ОКП, поскольку 94% сближений на ГСО и СВО происходит именно с яркими КО [1].

Рис. 9. Вклад разных сегментов в наблюдения ярких ГСО-объектов с точными орбитами (синий цвет – совокупный вклад, зеленый цвет – НСОИ АФН, красный цвет – обсерватории Роскосмоса, желтый цвет – АО АНЦ, коричневый цвет – ПАО «МАК «Вымпел»)

Такая ситуация объясняется тем, что НСОИ АФН исторически ориентирована именно на обзорные наблюдения ярких ГСО-объектов и поэтому имеет в своем составе 16 обзорных телескопов с полями зрения от $3,4^\circ$ до 7° (т.е. больше, чем суммарно имеют Роскосмос и АО «АНЦ»), которые по своему географическому расположению равномернее перекрывают все долготы Земного шара. Таким образом, высокое качество каталога ярких ГСО-объектов обеспечивается многократным полным перекрытием всей области ГСО в широкой полосе 18° множественными обзорными наблюдениями малых телескопов, имеющими апертуры 19,2 см, 22 см и 25 см.

Сегменты Роскосмоса и АО «АНЦ» уделяют основное внимание обнаружению новых слабых (слабее $15,5^m$) фрагментов на ГСО и ВЭО. Вклад НСОИ АФН в наблюдение слабых КО на ГСО существенно скромнее, но в то же время он и в этой части является актуальным, поскольку каталог слабых КО на ГСО крайне нестабильный и практически непригодный для использования в прогнозах опасных сближений (рис. 10) [1], где показано состояние ГСО-каталога КО слабее $15,5^m$ за последние 2016-2017 гг.

Рис. 10. Количество измеренных (коричневый цвет) и контролируемых (зеленый цвет) слабых ГСО-объектов с блеском менее $15,5^m$ в базе данных по месяцам за 2015-2017 гг.

Количество слабых КО сильно переменно и может изменяться в течение одного года в 2 раза, делая скачок то в большую, то в меньшую сторону – сотни слабых объектов обнаруживаются и тут же снова теряются. Примерно каждые 5 месяцев каталог пополняется, а затем уменьшается на 250-300 КО, что составляет до 50–60% каталогизированных слабых КО. При этом существенна разница между количеством измеренных и контролируемых КО. Количество устойчиво сопровождаемых слабых КО может стремиться к нулю, как уже было в мае 2016 г., в то же время годом позже таких КО было менее 100. В среднем количество слабых КО с точными орбитами не превышает 10–30%. Вывод очевиден: ведение каталога в части слабых КО практически безрезультативно, что также подтверждается данными на рис. 11 [1], где отображена динамика изменения обнаруженных новых и потерянных КО по годам, число ежегодно обнаруживаемых КО сопоставимо с числом ранее потерянных. Прирост открытых высокоорбитальных КО в последние годы идет очень быстрыми темпами, но одновременно растет и количество переобнаруживаемых КО, а значит, растет и количество потерянных.

Рис. 11. Статистика открываемых и переоткрываемых объектов на высоких орбитах по годам. Оранжевый цвет – новые КО, голубой цвет – потерянные и вновь обнаруженные КО

В среднем число измеренных КО увеличилось, но поддерживать их количество на одном уровне не удастся, что наглядно демонстрирует спад кривых после сентября 2017 г. на рис. 10 и рис. 12, и тем более не удастся сохранить значительное количество слабых контролируемых КО с точными орбитами (рис. 10). Это говорит о том, что используемые в настоящее время подходы к применению телескопов в интересах поддержания каталога слабых КО являются недостаточно эффективными. Другой важный момент, что поскольку сейчас новые слабые КО обнаруживаются главным образом случайно как «попутные», при наблюдениях каталогизированных КО по целеуказаниям, то нет никаких гарантий, что таким способом могут быть обнаружены все КО до определенного размера (абсолютной величины), так как кампании по поиску фрагментов разрушившихся КО слишком редки (не чаще нескольких раз в год).

Таким образом, в состав НСОИ АФН входит большая часть малых российских телескопов, используемых для наблюдений КО в ОКП. Что позволяет ИПМ им. М.В. Келдыша РАН вносить определяющий вклад в решение задач мониторинга ярких ГСО-объектов и обеспечивает высокое качество поддержания каталога. Количество телескопов средней и большой апертуры в НСОИ АФН существенно меньше, чем в сегментах Роскосмоса и АО АНЦ, поэтому вклад в наблюдения слабых ГСО-объектов является умеренным. В то же время до сих пор не решена задача устойчивого поддержания каталога слабых ГСО-объектов, и простое наращивание количества телескопов не привело к улучшению качества. Поэтому, в первую

очередь, необходимо разобраться в причинах возникших проблем, чтобы совершенствовать методические аспекты наблюдений и повышать эффективность планирования наблюдений.

Рис. 12. Вклад разных сегментов в наблюдения ярких ГСО-объектов (синий цвет – совокупный вклад, зеленый цвет – ИПМ/НСОИ АФН, красный цвет – обсерватории Роскосмоса, желтый цвет – АО АНЦ, коричневый цвет – ПАО «МАК «Выпел»»)

Библиографический список

1. Voropaev V., Molotov I., Zakhvatkin M., Khutorovsky Z., Streltsov A., Stepanyants V., Borovin G., Pavlova E. Recent developments of the KIAM Space Debris database for space situation awareness and conjunction analysis // Proceedigs of the 69th International Astronautical Congress. Bremen, Germany. — 2018.
2. Molotov I., Agapov V., Titenko V., Khutorovsky Z., Burtsev Yu., Guseva I., Rumyantsev V., Ibrahimov M., Kornienko G., Erofeeva A., Biryukov V., Vlasjuk V., Kiladze R., Zalles R., Sukhov P., Inasaridze R., Abdullaeva G., Rychalsky V., Kouprianov V., Rusakov O., Litvinenko E., Filippov E. International scientific optical network for space debris research // Advances in Space Research. — 2008. — №4. — p. 1022-1028.
3. Молотов И.Е., Воропаев В.А., Юдин А.Н., Иванов Д.Е., Аистов Е.А., Боровин Г.К. Комплексы электронно-оптических средств для мониторинга околоземного космического пространства // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. — 2017. — №4. — вып. 2. — С. 110-116.

4. Kouprianov V., Molotov I. FORTE: ISON robotic telescope control software // Proc. 7th European Conference on Space Debris, Darmstadt, Germany. — 2017. — URL: <http://spacedebris2017.sdo.esoc.esa.int>
5. Molotov I., Zolotov V., Fakhrutdinov T., Rumyantsev V., Schildknecht T., Matkin A., Namkhai Tungalag, Vikhristenko A., Montojo F.J., Kokina T., Zalles R., Inasaridze R. New subsystem of the ISON optical network to improve the conjunction analysis // Proceedings of the 66th International Astronautical Congress. Jerusalem, Israel. — 2015.
6. 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. Proceedings of the 65th International Astronautical Congress. Toronto, Canada. — 2014.
7. Molotov I., Schildknecht T., Montojo F.J., Rumyantsev V., Biryukov V., Zolotov V., Fakhrutdinova T., Zakhvatkin M., Voropaev V., Borovin G., Elenin L., Chestnov D., Kokina T., Namkhai T., Zalles R., Inasaridze R., Vikhristenko A., Buyko S., Smirnov A., Kornienko G., Erofeeva A., Wolf A., Kaplinskiy A., Rusakov O., Mokhnatkin A. Increasing of new GEO/HEO space debris discovery rate with ISON optical network // Proceedings of the 67th International Astronautical Congress (IAC). Guadalajara, Mexico. — 2016.
8. Molotov Igor, Agapov Vladimir, Rumyantsev Vasiliy, Biryukov Vadim, Kornienko Gennadiy, Litvinenko Elena, Vikhristenko Alexander, Zalles Rodolfo, Guseva Irina, Inasaridze Raguli. Global GEO survey subsystem of the ISON // Abstracts of 37th COSPAR Scientific Assembly. Montreal, Canada. — 2008.
9. Шилин В.Д., Лукьянов А.П., Молотов И.Е., Агапов В.М., Колесса А.Е. Проблемы предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве. Планы и возможности. Роль оптических наблюдений // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. — 2013. — № 4. — том 2. — С. 171-175.
10. Боровин Г.К., Захваткин М.В., Степаньянц В.А., Усовик И.В. Статистическая модель распределения космических объектов в пространстве орбитальных параметров // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. — 2018. — № 85. — doi:10.20948/prepr-2018-85
11. Хуторовский З.Н. Итоги работы в 2017 году гражданских оптических средств по контролю космических околоземного космического пространства // частный отчёт. — 2018.