



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

Молотов И.Е., Агапов В.М.,  
Стрельцов А.И., Еленин Л.В.,  
Шильдкнехт Т., Тунгалаг Н.,  
Буянхишиг Р., Голиков А.Р.,  
Капралов М.А., Сибиченкова М.А.,  
Иванов Д.Е., Крылов А.Н.,  
Жорниченко А.А., Позаненко А.С.

Проблемы оптического  
мониторинга космического  
мусора

**Рекомендуемая форма библиографической ссылки:** Проблемы оптического мониторинга космического мусора / И.Е.Молотов [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2020. № 7. 17 с.  
<http://doi.org/10.20948/prepr-2020-7>  
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2020-7>

**Ордена Ленина  
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ  
имени М.В.Келдыша  
Российской академии наук**

**И.Е. Молотов, В.М. Агапов, А.И. Стрельцов, Л.В. Еленин,  
Т. Шильдкнехт, Н. Тунгалаг, Р. Буянхишиг, А.Р. Голиков,  
М.А. Капралов, М.А. Сибиченкова, Д.Е. Иванов,  
А.Н. Крылов, А.А. Жорниченко, А.С. Позаненко**

**Проблемы оптического мониторинга  
космического мусора**

**Москва — 2020**

*Молотов И.Е., Агапов В.М., Стрельцов А.И., Еленин Л.В., Шильдкнехт Т., Тунгалаг Н., Буянхишиг Р., Голиков А.Р., Капралов М.А., Сибиченкова М.А., Иванов Д.Е., Крылов А.Н., Жорниченко А.А., Позаненко А.С.*

### **Проблемы оптического мониторинга космического мусора**

В статье описаны этапы развития отечественной сети оптического мониторинга околоземного космического пространства. Помимо этого рассмотрены текущие проблемы каталога высокоорбитальных космических объектов в базе данных Центра сбора, хранения, обработки и анализа научной информации по космическому мусору в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

**Ключевые слова:** космический мусор, база данных, каталог космических объектов, геостационарная орбита, высокоэллиптическая орбита, оптический телескоп, сеть обсерваторий, астрометрические измерения.

*Molotov I.E., Agapov V.M., Streltsov A.I., Elenin L.V., Schildknecht T., Tungalag N., Buyanhisig R. Golikov A.R., Kapralov M.A., Sibichenkova M.A., Ivanov D.E., Krylov A.N., Zhornichenko A.A., Pozanenko A.S.*

### **Problems of optical monitoring of space debris**

The article describes the stages of development of the national network of optical monitoring of near-Earth space and current problems of the catalog of high-orbit space objects in the database of the Center for collection, storage, processing and analysis of scientific information on space debris at Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS.

**Key words:** space debris, database, catalogue of space objects, geostationary orbit, high elliptical orbit, optical telescope, observatory network, astrometric measurements.

Работа была частично поддержана грантом РФФИ 17-51-44018 Монг\_а.

## **Оглавление**

1. Введение .....	3
2. Этапы развития отечественной сети оптических средств для мониторинга ОКП .....	4
3. Текущий состав сети оптических средств для мониторинга ОКП.....	7
4. Состояние каталога высокоорбитальных КО по результатам наблюдений.....	8
5. Заключение.....	15
9. Библиографический список.....	16

## 1. Введение

Освоение околоземного космического пространства (ОКП) привело к появлению новых проблем, связанных с техногенной засоренностью, так называемым «космическим мусором» (КМ). В связи с ростом популяции космического мусора и работающих спутников (по некоторым оценкам, количество отслеживаемых на околоземных орбитах КО превысило 25000), а также увеличением количества участников космической деятельности задачи изучения, моделирования и предотвращения техногенных угроз осуществлению космической деятельности являются сейчас как никогда актуальными. Уже имеются реальные случаи столкновения космических объектов, принадлежащих разным странам.

Геостационарная орбита (ГСО) – ограниченный природный ресурс, и здесь ожидаемо усиление соперничества за обладание точками стояния и частотным ресурсом. Поэтому усилия по мониторингу обстановки в ОКП предпринимаются очень большим перечнем стран и частично координируются в рамках заседаний Межагентского координационного комитета по космическому мусору (МККМ) и Комитета ООН по использованию космического пространства в мирных целях (COPUOS). Основной проблемой является отсутствие в открытом доступе полных и точных данных по космическим объектам и их орбитам, поскольку мониторингом ОКП традиционно занимаются военные и космические агентства различных стран (хотя уже появляются первые коммерческие поставщики измерительной информации).

Данные о космической обстановке в ОКП получаются с помощью оптических (наземного и космического базирования) и радиолокационных комплексов. Обычно для мониторинга космического мусора на низких орбитах используются радиолокаторы, а для высоких орбит – оптические телескопы. Наиболее мощной сетью радиолокационных станций, оптических телескопов и специализированных спутников обладают США. Второй по величине в мире является российская сеть, которая включает радиолокационные и оптические станции МО РФ, и оптические средства Роскосмоса, институтов РАН и организаций промышленности. Гражданская составляющая отечественной сети мониторинга ОКП создавалась при координирующей роли ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. В данной работе показано поэтапное развитие сети гражданских оптических средств в зависимости от изменения задач мониторинга ОКП и степени осведомленности о популяции космического мусора на высоких орбитах.

## 2. Этапы развития отечественной сети оптических средств для мониторинга ОКП

Основными инструментами для исследования популяции космического мусора в интересах решения научных и прикладных задач являются база данных (каталог) и модель популяции. Качественные и количественные параметры этих инструментов критически зависят от полноты и качества поступающей измерительной (координатной) информации о космических объектах. Ввиду все 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. С целью наполнения ЦСИТО РАН информацией в ИПМ им. М.В. Келдыша были развёрнуты работы по налаживанию регулярного получения измерительных данных. С этого момента начался международный проект Научная сеть оптических инструментов для астрометрических и фотометрических измерений (НСОИ АФН/ISON). В итоге это привело к формированию существующей глобальной межведомственной системы мониторинга ОКП. За 15 лет общими усилиями была создана группировка из 85 наблюдательных средств, которая имеет возможность контролировать всю ГСО и позволила обнаружить и сопровождать около 9000 КО на высоких орбитах — ГСО, высокоэллиптических (ВЭО) и средневысоких (СВО).

На момент начала проекта в 2003 г. проводились только наблюдения ограниченного перечня ярких (до 14 звездной величины) объектов ГСО по целеуказаниям, а орбитальные данные по слабым фрагментам космического мусора практически отсутствовали. В то же время статистические (на проход объектов через поле зрения телескопа) наблюдения на 1-м телескопе Цейсс-100 на Тенерифе (Европейское космическое агентство), проводимые командой Астрономического института Бернского университета (АИБУ), позволили обнаружить существование большой фракции некаталогизированных объектов со слабым абсолютным блеском, в диапазоне 15–21 звездных величин.

Поэтому в качестве первой цели проекта было решено получить независимое подтверждение существования слабых фрагментов и проверить гипотезу появления объектов с большим отношением площади к массе (БОПМ). ИПМ им. М.В. Келдыша РАН совместно с Главной астрономической обсерваторией (ГАО) РАН и Крымской астрофизической обсерваторией (КраО) провёл ряд экспериментов по наблюдению объектов в области ГСО. Были отработаны методы планирования и проведения наблюдений, обработки получаемых кадров, привязки времени измерений и прочих операций. В 2004 г. было налажено сотрудничество с АИБУ — первым европейским партнером проекта, начали восстанавливаться связи с обсерваториями стран Содружества независимых государств. Эти работы позволили впервые в России открыть малоразмерные фрагменты космического мусора на высоких орбитах и

подтвердить наличие облаков фрагментов на ГСО, порожденных разрушением нескольких КА. Впервые в мире было отработано сопровождение БОПМ-объектов на длительных интервалах времени, что позволило реконструировать их орбиты и проанализировать баллистическую эволюцию.

В 2007 г. перед НСОИ АФН была поставлена задача обнаружения и сопровождения всех ГСО-объектов с блеском не слабее 15,5 звездной величины с целью независимого ведения каталога КО. Поэтому было принято решение разработать специализированные обзорные инструменты с апертурой 22 сантиметра и большим полем зрения, чтобы образовать в составе НСОИ АФН новую поисково-обзорную подсистему. ИПМ им. М.В. Келдыша РАН организовал пробные эксперименты в КрАО и ГАО РАН, которые позволили отработать методику "сплошных" обзоров, 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 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. Было показано, что для полного двойного перекрытия за ночь всей видимой части ГСО необходимо иметь поле зрения телескопа порядка  $4 \times 4$  градуса, что было реализовано с 22-см телескопами СРТ-220 и ОРИ-22. Было установлено 8 таких инструментов, в том числе на Камчатке и в Боливии, что позволило впервые в России перекрыть наблюдениями всю область ГСО. Каждый такой обзорный телескоп получает за полную ночь несколько тысяч измерений по нескольким сотням объектов. Для наблюдений по ЦУ были заказаны 25-см телескопы ГАС-250 и ОРИ-25, которые вошли в подсистему наблюдений ярких КО по целеуказаниям.

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) 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, до 10–12 часов, удлинялись измерительные дуги по каждому КО, попавшему в обзор, а следовательно, увеличивалась точность орбит большей части ГСО-объектов. Кроме того, за счет более регулярного просмотра ГСО обеспечивается возможность отслеживания маневров КА в кластерах в точках стояния. Для выполнения расширенных обзоров ГСО были заказаны 19,2-см телескопы ВТ-78а с полем зрения  $7 \times 7$  градусов. Телескопы ВТ-78а были установлены в Уссурийске, Хуралтогооте (Монголия), Мульте

(республика Алтай), Кисловодске и Тирасполе (Приднестровская молдавская республика). Каждый такой телескоп получает за полную ночь до 15 тысяч измерений по 500–700 объектам.

Таким образом, задача мониторинга ярких (до 15,5 звездной величины) ГСО объектов в целом была решена. Следующей проблемой, которую необходимо было решить, являлось улучшение осведомленности о популяции высокоэллиптических КО и малоразмерных фрагментов на высоких орбитах. Для этого 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. Проекции орбит ВЭО-объектов на небесной сфере распределены существенно более широко по сравнению с ГСО (см. рис. 1), поэтому в первую очередь были разработаны оптические средства для более скоростного обзора.

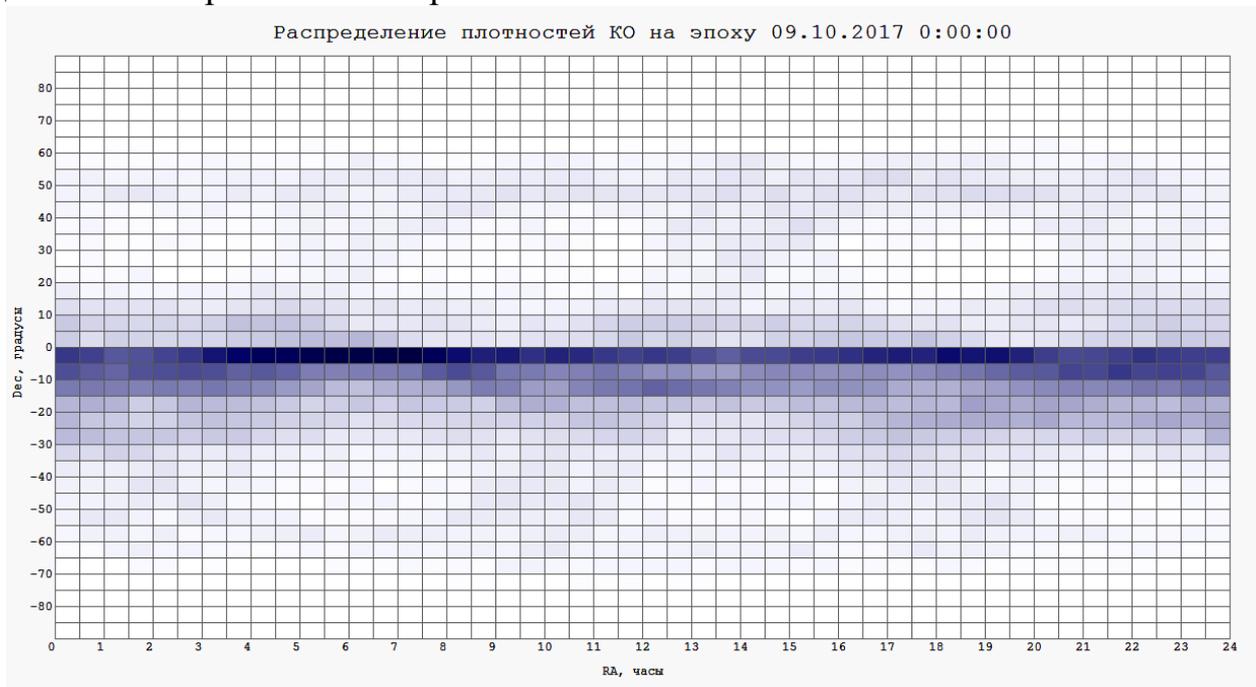


Рис. 1. Распределение плотностей группы ВЭО на заданную эпоху.

Кроме того, поскольку ВЭО-объекты на некоторых участках своей орбиты имеют высокие скорости движения, в новых оптических средствах были использованы ПЗС-камеры с электронным затвором с целью обеспечения повышенной точности позиционных измерений (поскольку электронный затвор дает более точную регистрацию времени измерений).

В комплексах первого поколения ЭОП-1 (экспериментальный оптический пункт) 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, получив суммарное поле зрения 9x7 градусов. В комплексах второго поколения ЭОП-2, на одном опорно-поворотном устройстве, были объединены уже 4 телескопа ВТ-78а, с суммарным полем зрения 9x14 градусов. Для проведения

локальных обзоров ГСО в интересах обнаружения малоразмерных фрагментов комплексы ЭОП-2 были оснащены 65-см телескопами САНТЕЛ-650А с полем зрения  $2,2 \times 2,2$  градуса. Для улучшения сопровождения уже известных слабых КО в состав комплексов ЭОП-1 и ЭОП-2 было введено шесть 40-см телескопов (ОРИ-40 и САНТЕЛ-400А) с турелью и светофильтрами BVRI. По рекомендации ИПМ им. М.В. Келдыша РАН четыре обсерватории ЭОП-1 были установлены в Кисловодске, Бюракане и Научном в Крыму (2 комплекта), а ЭОП-2 были размещены в Кисловодске и Благовещенске. В обоих типах обсерваторий для управления телескопами и обработки ПЗС-кадров использовалось типовое программное обеспечение НСОИ АФН – FORTE и АРЕХП соответственно.

### 3. Текущий состав сети оптических средств для мониторинга ОКП

Географическое расположение обсерваторий, участвующих в наблюдениях космического мусора, показано на рис. 2.

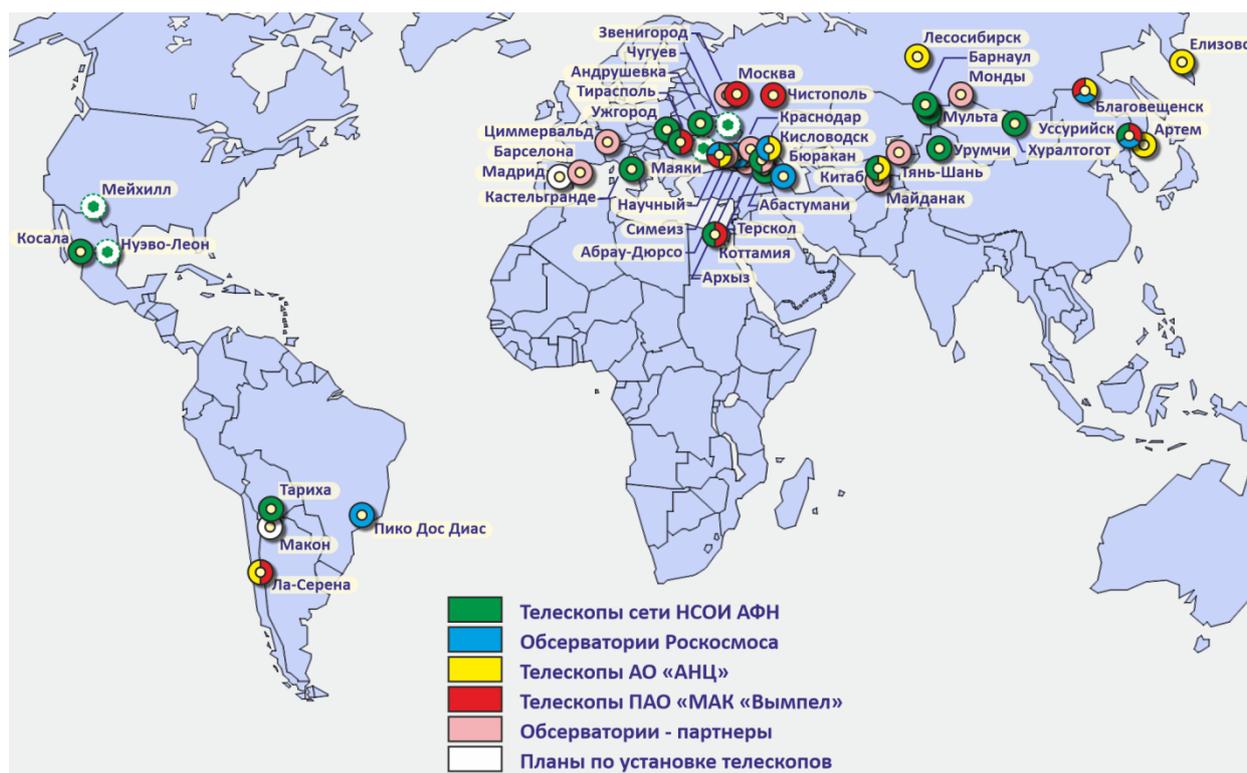


Рис. 2. Географическое расположение обсерваторий отечественной сети мониторинга ОКП. Принадлежность телескопов обозначена цветом

В наблюдениях участвуют специализированная сеть обсерваторий Роскосмоса (ОКР «АСПОС ОКП», отмечены на карте синим цветом), сеть обсерваторий научной кооперации ИПМ им. М.В. Келдыша РАН (НСОИ АФН/ISON, зеленый цвет), работают отдельные средства и целые группировки средств институтов РАН, организаций промышленности (ПАО «МАК

«Вымпел», красный цвет, АО «АНЦ», желтый цвет). Хотя наиболее весомый вклад сейчас вносит сеть обсерваторий Роскосмоса, НСОИ АФН все еще остается лидером по количеству телескопов и обсерваторий. Именно за счет НСОИ АФН обеспечивается полное перекрытие ГСО, а обзорно-поисковая подсистема продолжает играть важную роль в мониторинге ярких (до 15,5 звездной величины) ГСО-объектов.

Телескопы сети сгруппированы по следующим основным направлениям работы их подсистем:

- общий обзор ГСО (до 15,5 звездной величины);
- расширенный обзор ГСО (до 14 звездной величины);
- сопровождения слабых (слабее 15,5 звездной величины) объектов космического мусора на ГСО и геопереходных орбитах;
- сопровождения ярких объектов на ГСО и ВЭО;
- локальные обзоры ГСО повышенного проникновения (до 18 звездной величины);
- наблюдения по целеуказаниям объектов на низких орбитах и высокоэллиптических орбитах в перигейной области.

Помимо этого, один телескоп выполняет обзоры апогейной области орбит типа «Молния».

Обзоры ГСО выполняются с помощью 22–25 см телескопов с полями зрения 3,5–4 градуса (имеется один 50-см телескоп в Барселоне, Испания). Расширенные обзоры ГСО проводятся 18–19,2 см телескопами полями зрения 7–14 градусов. Обнаружение слабых КО в локальных обзорах ГСО проводится 50–65 см телескопами с полями зрения более 4 квадратных градусов. Также один 75-см телескоп комплекса ОЭК ОК в Бразилии имеет поле зрения 4,8x5,6 градусов. Сопровождение слабых фрагментов выполняется телескопами апертурой от 40 до 80 см. В дополнение к этому, три крупных телескопа (1,6-м АЗТ-33ВМ и 1,7-м АЗТ-33ИК в Мондах, и 2-м Цейсс-2000 на Терсколе) проводят эпизодические наблюдения малоразмерных КО на высоких орбитах.

#### **4. Состояние каталога высокоорбитальных КО по результатам наблюдений**

За последние годы состав каталога высокоорбитальных КО существенно изменился. На рис. 3 представлены диаграммы количества высокоорбитальных КО по типам орбит в базе данных ЦСИТО РАН по годам. С одной стороны, в каталоге значительно увеличилось число КО на высокоэллиптических орбитах, а с другой, благодаря четырём выявленным разрушениям (рис. 4) было каталогизировано более 2000 новых фрагментов космического мусора. Впервые за длительное время в течение 2019 года практически нет прироста популяции ГСО-объектов. По состоянию на 19.09.2019 общее количество высокоорбитальных КО в базе данных ЦСИТО РАН достигло 9300 объектов. При этом число КО с достоверной оценкой среднего приведенного блеска

составило 8838 объектов, что составляет 95,0% от общего числа (рис. 5). Количество КО с отношением площади к массе больше 1 кв.м/кг – 2172, или 23,4% от общего числа КО (рис. 6).

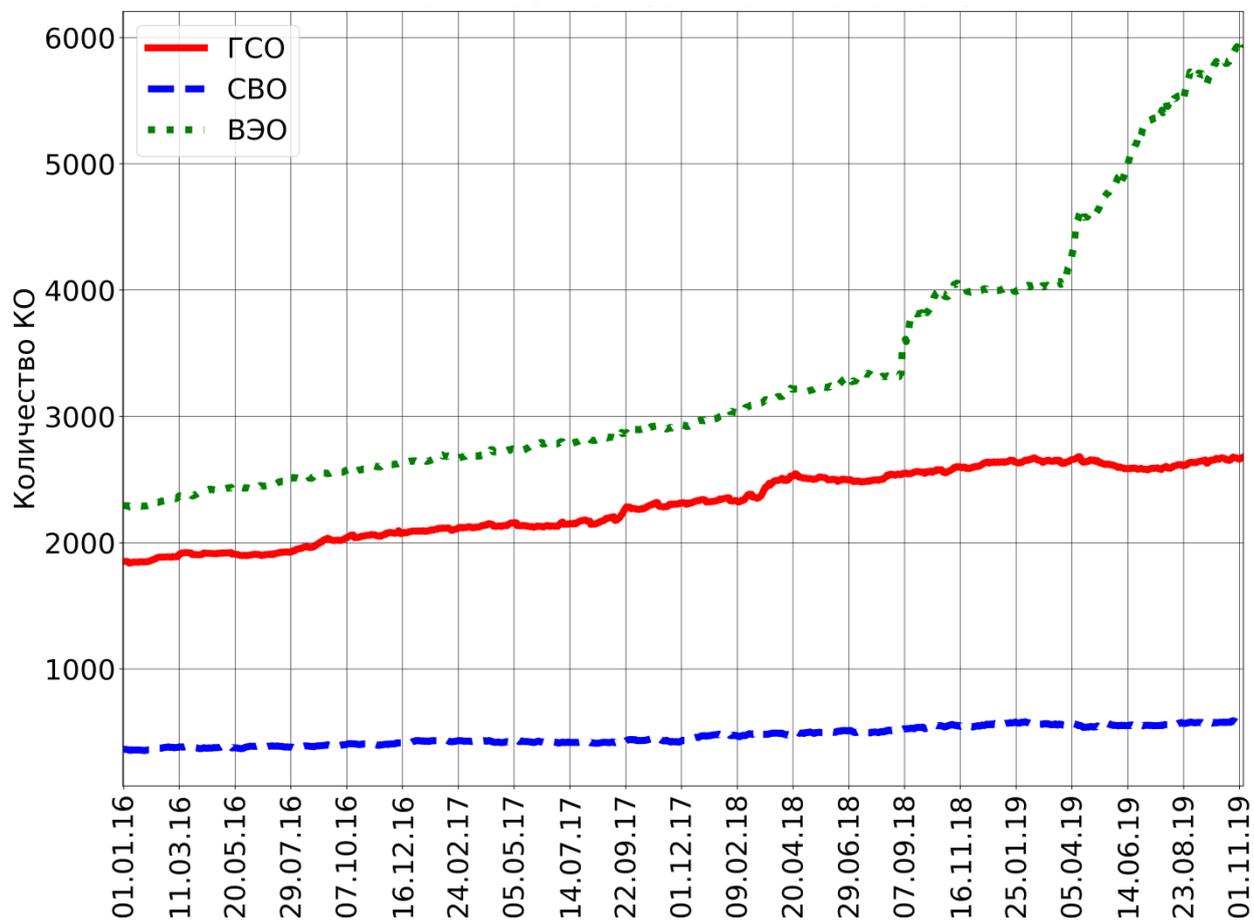


Рис. 3. Изменение количества высокоорбитальных КО по типам орбита в базе данных ЦСИТО РАН по годам



Рис. 4. Динамика изменения количества каталогизированных ВОКО, идентифицированных с источником образования, за 2018–2019 гг.

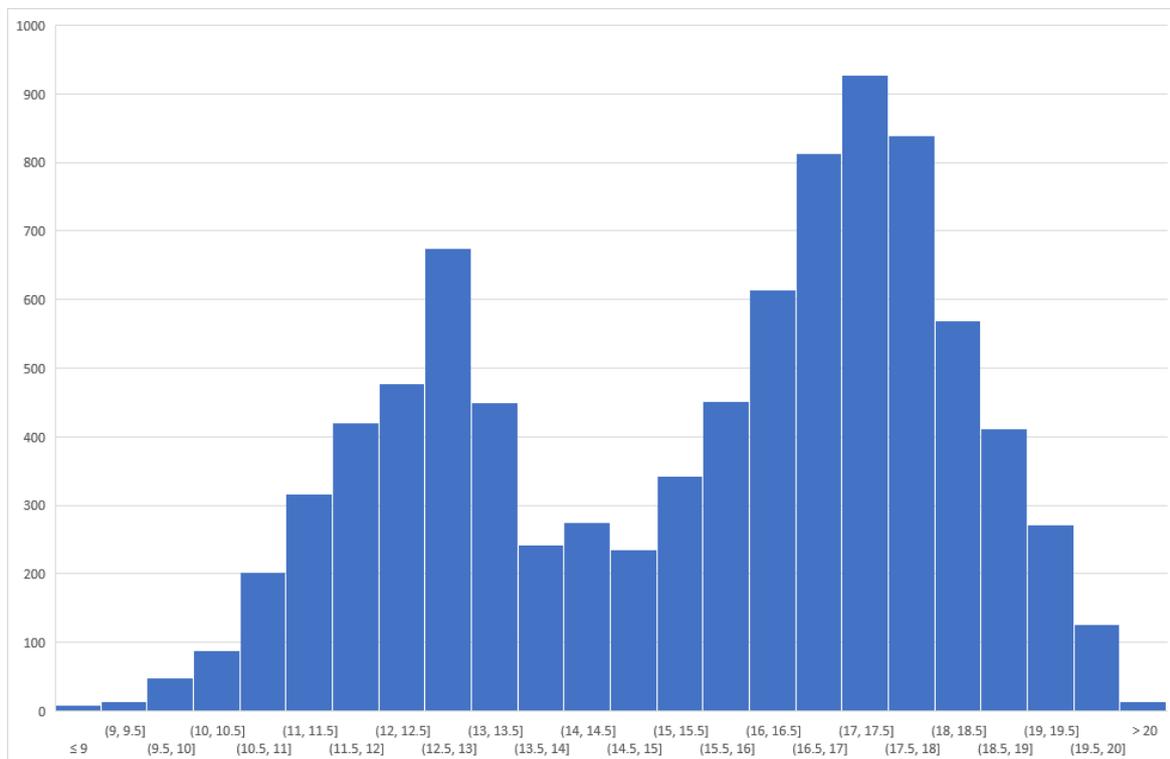


Рис. 5. Распределение КО в базе данных ЦСИТО РАН по среднему приведенному блеску

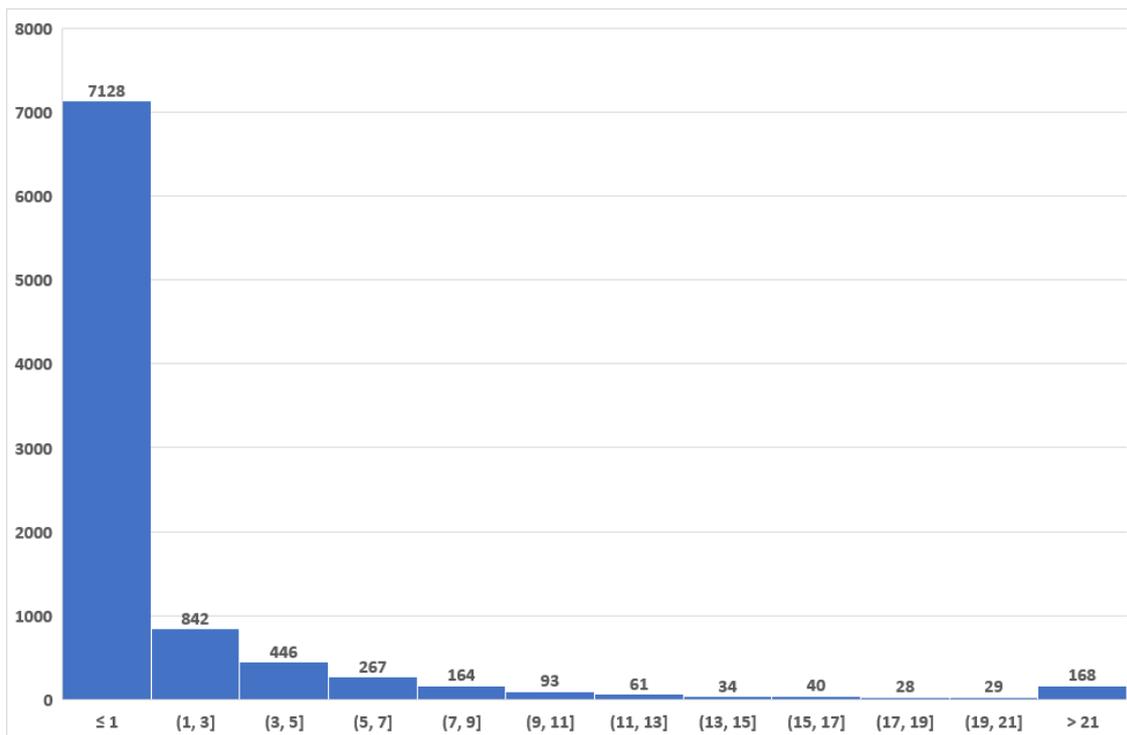


Рис. 6. Распределение КО в базе данных ЦСИТО РАН по среднему значению ОПМ, кв.м/кг

При этом качество каталога существенно различается для различных типов КО. На рис. 7 показано состояние каталога ярких ГСО-объектов в базе данных ЦСИТО РАН за 2016–2019 гг.

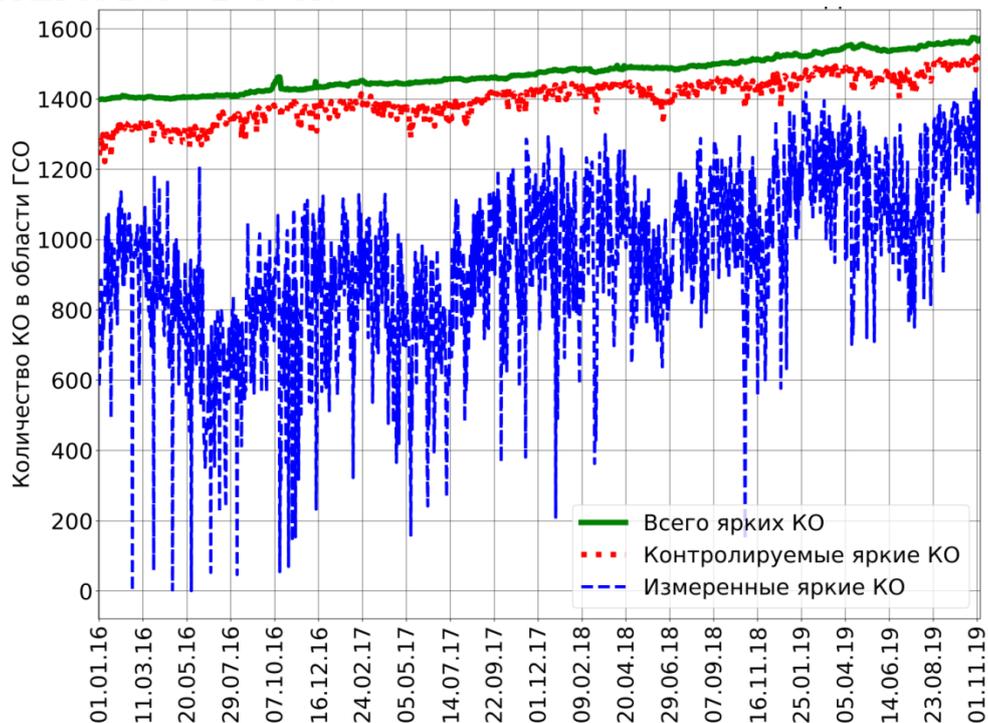


Рис. 7. Состояние каталога ярких ГСО-объектов в базе данных ЦСИТО РАН по годам

Кривыми разного цвета обозначены общее количество ярких (до 15,5 звездной величины) КО (зеленый цвет), количество измеренных за текущую ночь КО (синий цвет) и число КО с точными орбитами (красный цвет). В качестве критерия точности орбиты выбрана ошибка 0,1 минуты по времени вдоль орбиты КО.

Из рис. 7 видно, что в части ярких ГСО-объектов качество каталога очень хорошее, поскольку регулярно получают измерения по 90% каталогизированных объектов. Поэтому орбиты большинства КО имеют хорошую точность и разница между общим количеством КО и КО с точными орбитами (между зеленой и красной кривыми) – минимальная. В связи с этим каталог в части ярких ГСО-объектов может использоваться для достоверных прогнозов опасных сближений.

На рис. 8 показано состояние каталога ярких ВЭО-объектов в базе данных ЦСИТО РАН за 2016–2019 гг. Из рисунка видно, что качество каталога также высокого уровня, поскольку и здесь разница между общим количеством КО и КО с точными орбитами (между зеленой и красной кривыми) также небольшая, хотя регулярные измерения приходят по в 2 раза меньшему количеству КО (45% объектов), по сравнению с яркими ГСО-объектами.

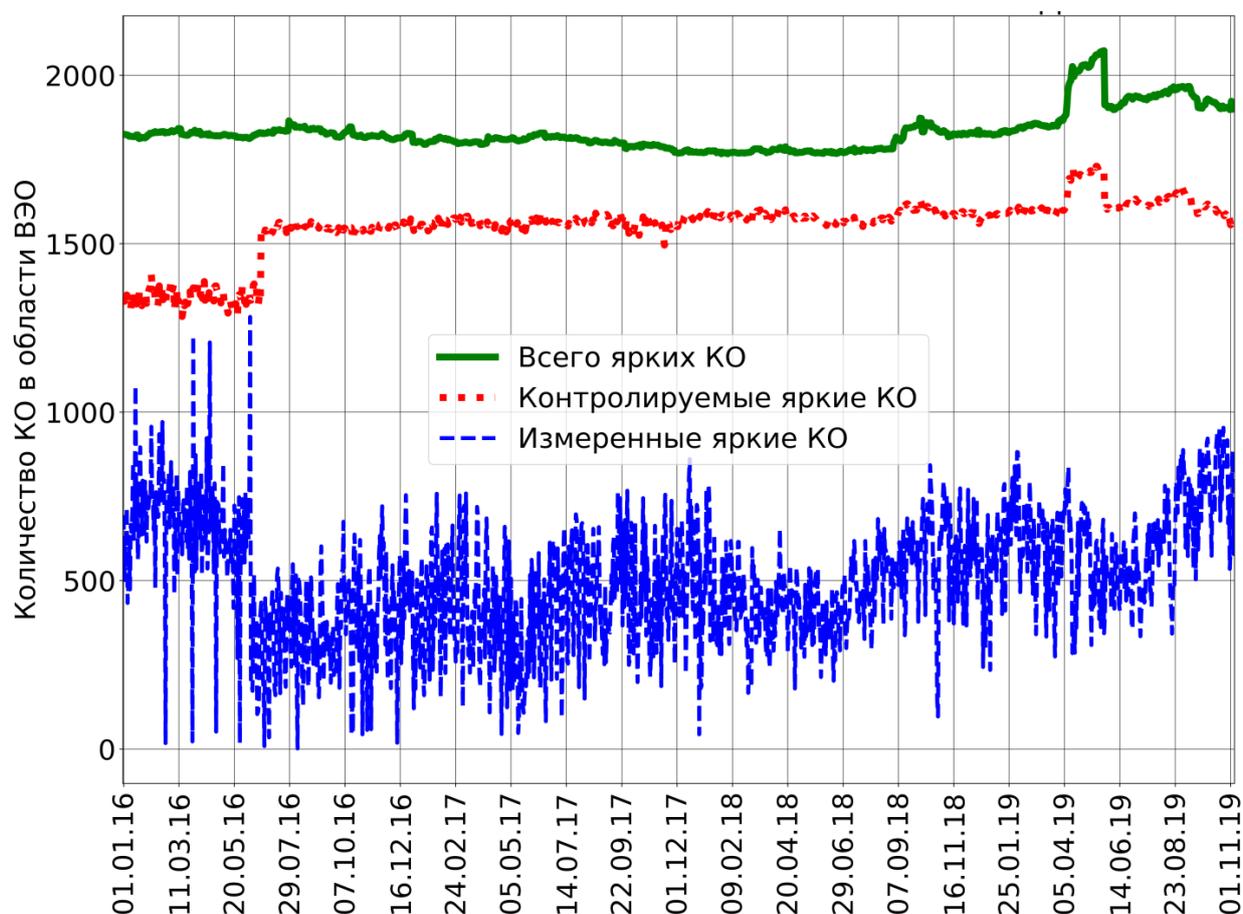


Рис. 8. Состояние каталога ярких ВЭО-объектов в базе данных ЦСИТО РАН по годам

Тем не менее, этого оказывается достаточным, чтобы сохранять хорошую точность орбит для большинства КО, поэтому и в части ярких ВЭО-объектов каталог может быть успешно использован для решения задач АСПОС ОКП.

На рис. 9 показано состояние каталога в базе данных ЦСИТО РАН в части слабых (слабее 15,5 звездной величины) КО на ГСО за 2016-2019 гг. Из рисунка видно, что разрыв между общим количеством КО и КО с точными орбитами (между зеленой и красной кривыми) велик: только 34,5% КО соответствуют выбранному критерию достаточной точности орбит. Заметно, что число КО с точными орбитами сильно меняется примерно каждые 4 месяца, а в последние 2 года оно существенно уменьшилось, что свидетельствует о начале деградации каталога этого типа КО. Это вызвано тем, что регулярно получают измерения только по очень небольшому проценту слабых КО на ГСО – 17% (иногда уменьшаясь до 5–7 %). В связи с вышесказанным каталог в части слабых ГСО-объектов не может быть использован для расчета достоверных прогнозов опасных сближений в интересах АСПОС ОКП.

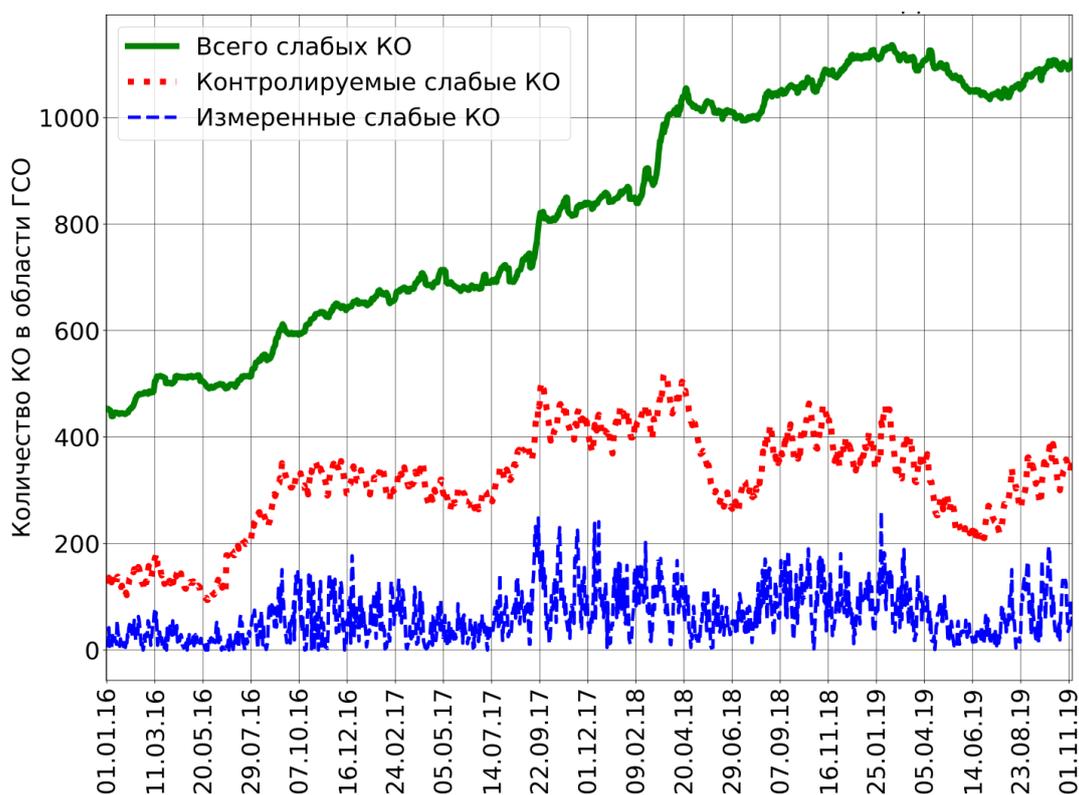


Рис. 9. Состояние каталога слабых ГСО-объектов по годам

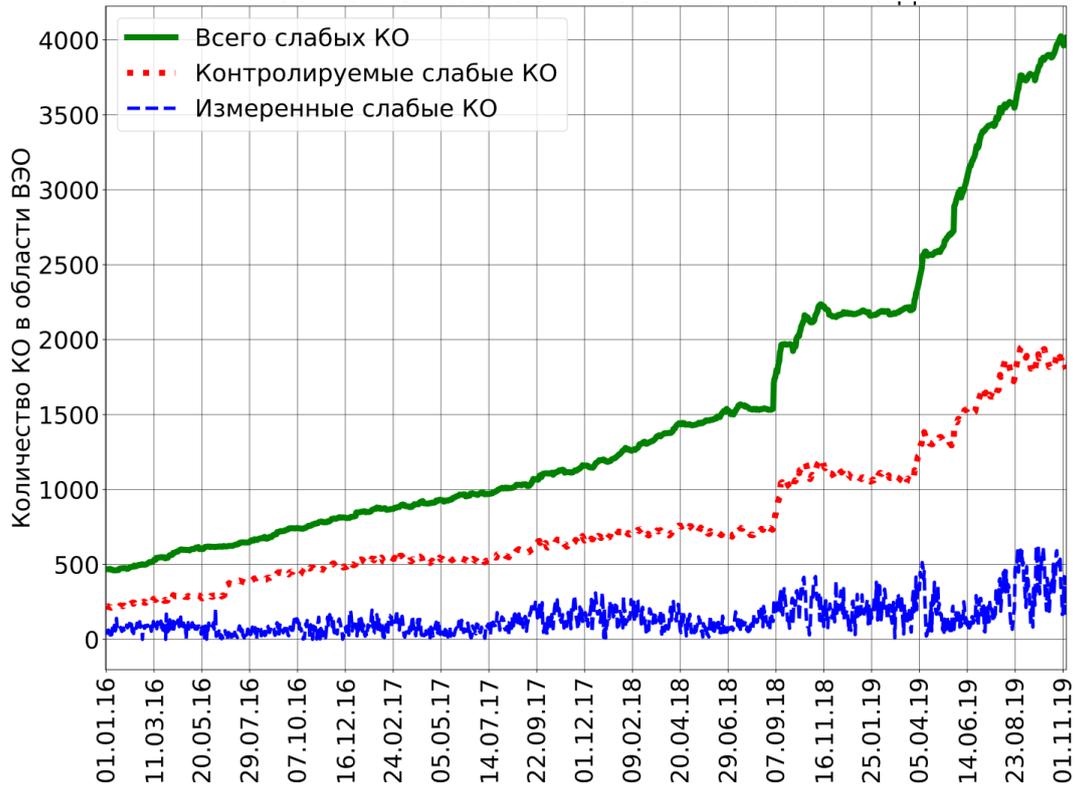


Рис. 10. Состояние каталога слабых ВЭО-объектов по годам

На рис. 10 показано состояние каталога в базе данных ЦСИТО РАН в части слабых (слабее 15,5 звездной величины) КО на ВЭО за 2016-2019 гг. Из рисунка видно, что разрыв между общим количеством КО и КО с точными орбитами (между зеленой и красной кривыми) растет с каждым годом. Только 47,5% КО в конце 2019 года имели достаточную точность орбит. Регулярно получают измерения только по 15% объектов. Качество каталога в части слабых ВЭО-объектов невысоко и продолжает ухудшаться, делая его все более непригодным для прогнозов опасных сближений в интересах АСПОС ОКП.

Деградация каталога в части слабых КО на ГСО и ВЭО происходит из-за резкого увеличения общего числа КО в каталоге (рис. 11), при этом количество привлекаемых для наблюдений телескопов уменьшилось из-за технических и организационных проблем.

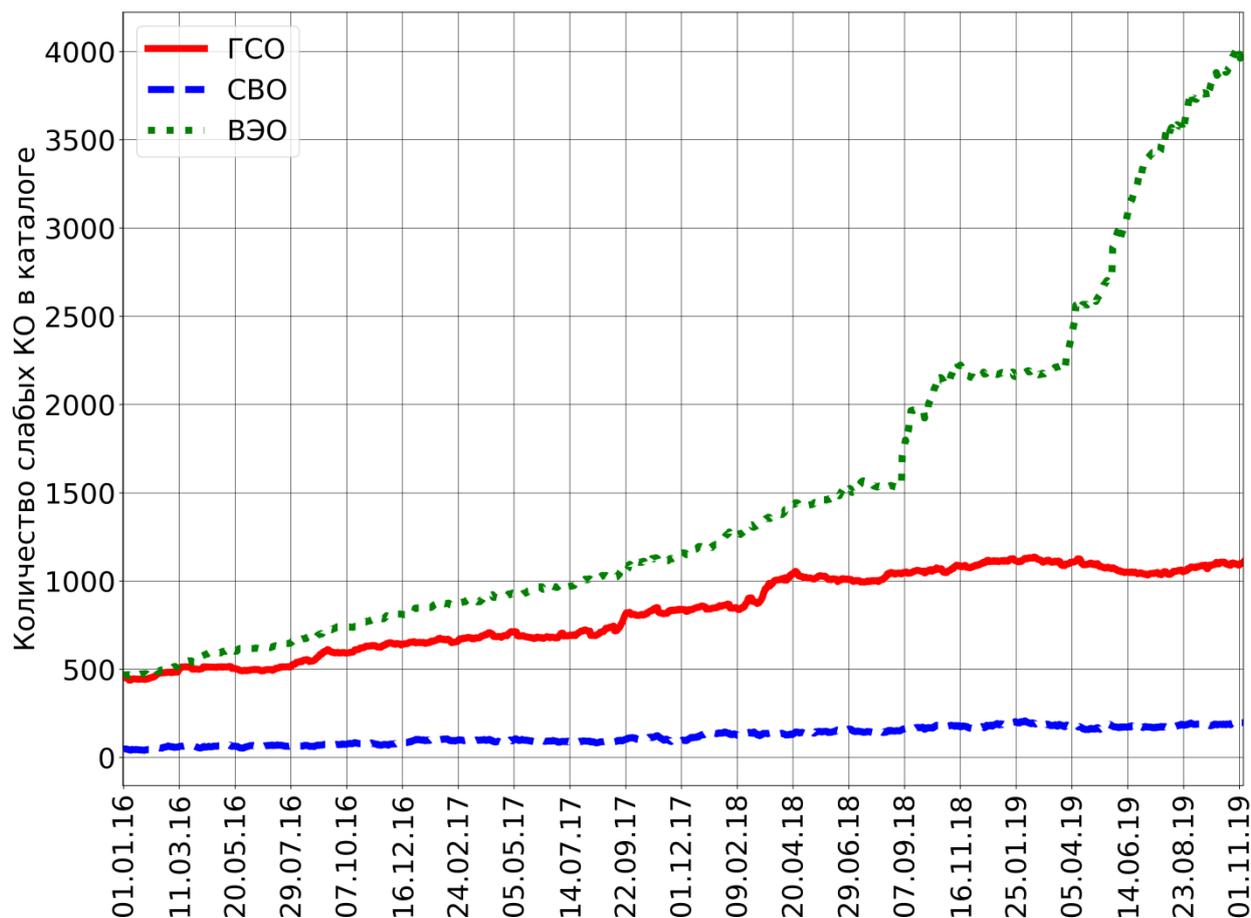


Рис. 11. Изменение количества слабых КО в базе данных ЦСИТО РАН по годам

На рис. 11 видно, что произошел резкий рост количества слабых ВЭО-объектов – популяция увеличилась в 5 раз. Сейчас количество слабых ВЭО-объектов в 2 раза больше, чем слабых ГСО-объектов. Поэтому текущий состав отечественной сети оптических средств для мониторинга ОКП не позволяет «обслуживать» такое количество слабых КО, кроме того, наблюдательный ресурс перераспределился в сторону сопровождения слабых ВЭО-объектов, поэтому и снизилось качество каталога слабых ГСО-объектов. Для выправления ситуации необходимо либо правильно расставить приоритеты (определить, какие типы КО важнее наблюдать для решения задач АСПОС ОКП), либо разработать и внедрить новые наблюдательные методики (полный обзор ГСО с большим проницанием, панорамный обзор ВЭО-объектов в перигее). Простое же увеличение количества телескопов для сопровождения КО по целеуказаниям может не привести к улучшению параметров каталога, поскольку попутно будут обнаруживаться новые слабые КО, что снова приведет к недостаточности наблюдательного ресурса.

## 5. Заключение

С использованием задела проекта НСОИ АФН была создана мощная группировка гражданских оптических наблюдательных средств, измерения

которых позволили к концу 2019 года поддерживать в ЦСИТО РАН орбитальный каталог для более чем 9000 космических объектов на высоких орбитах. При этом качество каталога существенно различается для различных типов космических объектов – для ярких космических объектов обеспечивается регулярное обновление орбит и 90% из них имеют точные орбиты, что позволяет использовать данный каталог для решения задач АСПО ОКП. В то время как в части слабых космических объектов регулярно обновляются только 20% орбит, поэтому качество каталога слабых космических объектов на геостационарных и высокоэллиптических орбитах снизилось за счет уменьшения процента объектов с точными орбитами – до 50%. Ввиду этого каталог в части слабых космических объектов не подходит для достоверного прогноза опасных сближений. Одна из причин такой деградации каталога – резкий (пятикратный) рост количества слабых ВЭО-объектов. Простое увеличение количества телескопов может не дать повышения качества каталога в части точных орбит. Необходимо искать новые подходы к наблюдениям.

## 9. Библиографический список

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. — стр. 233-248.

Molotov I., Agapov V., Titenko V., et al. International scientific optical network for space debris research // Advances in Space Research. — 2008. — Vol. 41. — Iss. 7 — p. 1022-1028.

Schildknecht T., Ploner M., Hugentobler U. The search for debris in GEO//Advances in Space Research. — 2001. — Vol. 28. — Iss. 9 —p. 1291-1299.

Вольвач А.Е., Румянцев В.В., Молотов И.Е. и др. Исследования фрагментов космического мусора в геостационарной области. Космическая наука и технология. — 2006 — т.12. — № 5/6. — стр. 50-57.

Аким Э.Л., Агапов В.М., Молотов И.Е., Степаньянц В.А. Исследования космического мусора на высоких околоземных орбитах, проводимые Институтом прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН // Сборник статей «Практические шаги по снижению техногенного засорения околоземного космического пространства». Роскосмос. — 2010. — стр. 16-21.

Molotov I., Agapov V., Khutorovsky Z. et al. Faint High Orbit Debris Observations with ISON Optical Network. // Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, Maui Economic Development Board, Inc. — 2009. — p. 190-199.

Базей А.А., Базей Н.В., Боровин Г.К. и др. Эволюция орбиты пассивного фрагмента с большой площадью поверхности на высокой околоземной орбите // Математическое моделирование и численные методы. — 2015. — № 1. — стр. 83–93.

Молотов И.Е., Еленин Л.В., Усовик И.В. и др. Анализ вклада сети НСОИ АФН в решение задач мониторинга космического мусора в области геостационарных орбит // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. — 2018. — № 274. — 14 стр.

Молотов И.Е., Агапов М.В., Ибрагимов М.А. и др. Глобальная система мониторинга геостационарной орбиты // Материалы международной конференции. Околосемная астрономия-2007. — 2008. — стр. 309-314.

Molotov I., Agapov V., Elenin L. et al. Application of the ISON wide field of view optical telescopes for space debris research // IACProceedings, Daejeon, Korea. — 2009. — IAC-09.A6.1.8.

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. — стр. 171-175.

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. — стр. 110-116.

Kouprianov V., Molotov I. FORTE: ISON robotic telescope control software. //Proc. 7th European Conference on Space Debris, Darmstadt, Germany. — 2017. — id 475. — 9 pages.

Молотов И.Е., Сун Р.Ю., Занг Ч. и др. Российско-китайские наблюдения фрагментов разрушения ракетной ступени «Центавр» — первый шаг к сети обсерваторий БРИКС // Всероссийская научная конференция "Космический мусор: фундаментальные и практические аспекты угрозы": Сборник трудов. Серия "Механика, управление и информатика", ИКИ РАН. — 2019. — стр. 95-102.