

Результаты исследований космического мусора с использованием задела проекта ИСОН

Молотов И.Е.¹, Чжу Т.², Еленин Л.В.¹, Юй Ш.², Стрельцов А.И.¹, Чжан Ч.², Захваткин М.В.¹, Степаньянц В.А.¹, Шильдкнехт Т.³, Ф. Грациани⁴, Магомед Н.⁵, Абдельазиз А.М.⁶, Шила И.⁷, Левшунов А.С.⁸, Выхристенко А.М.⁹, Русаков О.П.¹⁰, Сибиченкова М.А.¹

¹ *Институт прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН, г. Москва, Россия*

² *Обсерватория Пурпурной горы Китайской академии наук, г. Нанкин, Китай*

³ *Институт астрономии Университета Берна, Берн, Швейцария*

⁴ *Группа астродинамики по использованию космических систем, г. Рим, Италия*

⁵ *Центр астрономических наблюдений, г. Стелленбос, ЮАР*

⁶ *Национальный исследовательский институт астрономии и геофизики, г. Каир, Египет*

⁷ *Университет Коменского в Братиславе, г. Братислава, Словакия*

⁸ *Лесосибирский педагогический институт, г. Лесосибирск, Россия*

⁹ *Приднестровский государственный университет имени Т.Г. Шевченко, г. Тирасполь, Приднестровье*

¹⁰ *Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, г. Санкт-Петербург, Россия*

Инициативный проект ИСОН стартовал в 2004 г. при поддержке грантов. В широкой международной кооперации был отработан полный цикл исследований т.н. космического мусора — постановка задач, широкоугольные оптические телескопы, программное обеспечение, места для обсерваторий, модель популяции. ИСОН стал инкубатором инновационных решений, которые были внедрены при создании обсерваторий Роскосмоса и организаций промышленности. Глобальная межведомственная сеть включала 100 телескопов, что позволило получить научные и прикладные результаты мирового уровня. В последние годы ИСОН, в составе 44 телескопов, снова стал независимым международным проектом, выполняющим научные и прикладные работы за счет грантов.

Results of space debris research using the groundwork of the ISON project

Molotov I.E.¹, Zhu T.², Elenin L.V.¹, Yu Sh.², Streltsov A.I.¹, Zhang Ch.², Zakhvatkin M.V.¹, Stepanyants V.A.¹, Schildknecht T.³, Graziani F.⁴, Mahomed N.⁵, Abdelaziz A.M.⁶, Tealib S.K.⁶, Silha J.⁷, Levshunov A.S.⁸, Vykhristenko A.M.⁹, Rusakov O.P.¹⁰, Sibichenkova M.A.¹

¹ *Keldysh Institute of Applied Mathematics of the RAS, Moscow, Russia*

² *Purple Mountain Observatory, CAS, Nanjing, China*

³ *Astronomical Institute, University of Bern, Bern, Switzerland*

⁴ *Group of Astrodynamics for the Use of Space Systems, Rome, Italy*

⁵ *Astronomical Observation Centre, Stellenbosch, South Africa*

⁶ *National Research Institute of Astronomy and Geophysics, Cairo, Egypt*

⁷ *Faculty of Mathematics, Physics and Informatics, Comenius University in Bratislava, Bratislava, Slovakia*

⁸ *Lesosibirsk Pedagogical Institute, Lesosibirsk, Russia*

⁹ *Taras Shevchenko Transnistria State University, Tiraspol, Transnistria*

¹⁰ *Central Astronomical Observatory at Pulkovo, RAS, St. Petersburg*

The initiative ISON project started in 2004 with the support of grants. In a broad international cooperation, a full cycle of research on so-called space debris was worked out - setting tasks, wide-angle optical telescopes, software, places for observatories, a population model. And ISON became an incubator of innovative solutions that were implemented when creating observatories of Roscosmos and industrial organizations. The global interdepartmental network included 100 telescopes, which made it possible to obtain world-class scientific and applied results. In recent years, ISON, consisting of 44 telescopes, has again become an independent international project that performs scientific and applied work at the expense of grants.

1. Введение

Освоение и исследования околоземного космического пространства (ОКП) привело к появлению проблем, связанных с техногенной засоренностью т.н. «космическим мусором» (КМ). Задачи изучения, моделирования и предотвращения техногенных угроз осуществлению космической деятельности являются сейчас как никогда актуальными. Для их решения нужен научный инструмент в форме географически разнесенной сети оптических телескопов, перекрывающий все долготы земного шара. Попыткой создать подобный инструмент стал инициативный проект ИСОН, реализуемый за счет грантов и хозяйственных договоров.

2. Задел проекта ИСОН

Инициативный проект ИСОН [1] был начат в 2004 году на средства российских и зарубежных грантов. Во время его реализации были возобновлены наблюдения в 10-ти обсерваториях бывшего СССР — Тари-

№	Название	Оптическая схема/разработка	Апертура/фокус, мм	Поле, град	ПЗС-чип, мм
1	VT-78a	Шенкер-Теребиж/Борисов	192/296	7x7	36
2	2xVT-78a	Шенкер-Теребиж/Борисов	192/296	7x9	36x24
3	4xVT-78a	Шенкер-Теребиж/Борисов	192/296	9x14	36x24
4	6xTGS-200	Гамильтон-Юдин/Юдин-Санкович	200/307	4.5x42	36x24
5	SRT-220	Слефогт-Рихтер.-Теребиж/Борисов	220/507	4x4	36
6	ORI-22	Гамильтон-Теребиж/Борисов	220/510	4x4	36
7	ORI-25	Гамильтон-Теребиж/Борисов	250/625	3.35	36
8	Сантел-400А	Гамильтон-Юдин/Санкович	400/1200	1.75	36
9	ORI-40	Гамильтон-Теребиж/Борисов	400/920	2.25	36
10	Сантел-400з	Зоннефельд-Юдин/Санкович	400/500	5.5x4	50x36
11	ORI-50	Гамильтон-Теребиж/Борисов	500/1160	2.5	50
12	Сантел-650А	Гамильтон-Юдин/Санкович	650/1300	2.2	50

Таблица 1: Параметры телескопов и комплексов, разработанных в проекте ИСОН

ха (Боливия), Уссурийск, Благовещенск, Хуралтогот (Монголия), Китаб (Узбекистан), Гиссар и Санглок (Таджикистан), Абастумани (Грузия), Ужгород и Маяки (Украина), исследованы новые места для обсерваторий и организовано 8 новых пунктов наблюдений - на Камчатке, Дальнем Востоке, в Лесосибирске, Барнауле и Мульте (Алтай), Тирасполе, Косале и Нуэво-Леоне (Мексика), вовлечены 4 зарубежные обсерватории — Циммервальд (Швейцария), Барселона (Испания), Кастельгранде (Италия), Урумчи (Китай). Для оснащения сети было разработано несколько серий специализированных обзорных телескопов апертурой от 12,5 см до 65 см с большими полями зрения [1], см. Табл. 1, типовой набор программного обеспечения для управления оборудованием [2, 3] и обработки ПЗС-кадров, разработана система точной привязки времени измерений, отлажены новые наблюдательные методики для обзоров геостационарной орбиты (ГСО) и обнаружения малоразмерных фрагментов космического мусора. Сотрудники всех обсерваторий прошли переобучение, в штат ряда обсерваторий были привлечены любители астрономии.

Что позволило в 2007 г. впервые в отечественной практике перекрыть наблюдениями всю (ГСО). Проект ИСОН стал инкубатором инновационных решений в области мониторинга высоких околоземных орбит, которые были внедрены при создании обсерваторий Роскосмоса [1] и телескопов организаций промышленности.

Для Роскосмоса, в рамках ОКР АСПОС ОКП [4], были созданы экспериментальные образцы 50-см телескоп ОЭС-50 и 65-см телескоп (Сантел-650А) ОЭС-65, установленные в обсерватории Кисловодск и Уссурийск. Также на основе задела НСОИ были разработаны обсерватории ЭОП-1 и ЭОП-2 — использованы телескопы 2xVT-78a, 4xVT-78a, ORI-25, ORI-40, Сантел-650А, см. Табл. 1, служба времени, программное обеспечение для управления телескопами и обработки ПЗС-кадров, предложены места размещения — Научный (два ЭОП-1), Кисловодск (ЭОП-1 и ЭОП-2), Бюракан (ЭОП-1), Благовещенск (ЭОП-2), предложено место для размещения комплекса ОЭК ОКМ в обсерватории Пико дос Диоас (Бразилия).

АО «АНЦ» было оказано содействие в создании пунктов наблюдений на Камчатке, Дальнем Востоке, в Лесосибирске, Китабе, Ла Серена (Чили), произведено 6 телескопов (ORI-22, ORI-25, ORI-40), передано программное обеспечение, служба времени, привлечены наблюдатели. Для ПАО «МАК «Вымпел» было произведено 5 телескопов (VT-53, ORI-25, ORI-50), предложены места их размещения (Уссурийск, Благовещенск, Тирасполь, Краснодар, Ла Серена) [5].

На пике развития глобальная межведомственная сеть обсерваторий включала в себя до 100 телескопов в 33 обсерваториях 17 стран мира (Австралия, Армения, Боливия, Бразилия, Грузия, Испания, Италия, Китай, Мексика, Монголия, Приднестровье, Россия, США, Узбекистан, Украина, Швейцария, Чили). Многократное возрастание потока измерений привело к падению интереса к данным ИСОН и фактическому прекращению финансирования. Наблюдения средств Роскосмоса и кооперации ПАО «МАК «Вымпел» стали планироваться и финансироваться независимо. Попытка сохранить проект ИСОН в новых условиях была предпринята компанией ООО МИП «ИСОН Баллистика-Сервис».

3. Текущий состав ИСОН

В 2015 году для эксплуатации обсерваторий сети была создана специализированная компания — МИП «ИСОН Баллистика-Сервис», на баланс которой поставлено 32 телескопа. С 2019 г. координация, финансирование и развитие проекта ИСОН осуществляется через нее. Было подписано 10 договоров о научно-техническом сотрудничестве с зарубежными обсерваториями и университетами, получено несколько грантов на исследования космического мусора и заказов на наблюдения спутников. В МИП «ИСОН Баллистика-Сервис» создан новый центр планирования наблюдений, проводятся работы по созданию базы данных измерений и орбит. Осуществляется ограниченный обмен измерительными данными ИСОН с двумя зарубежными ор-

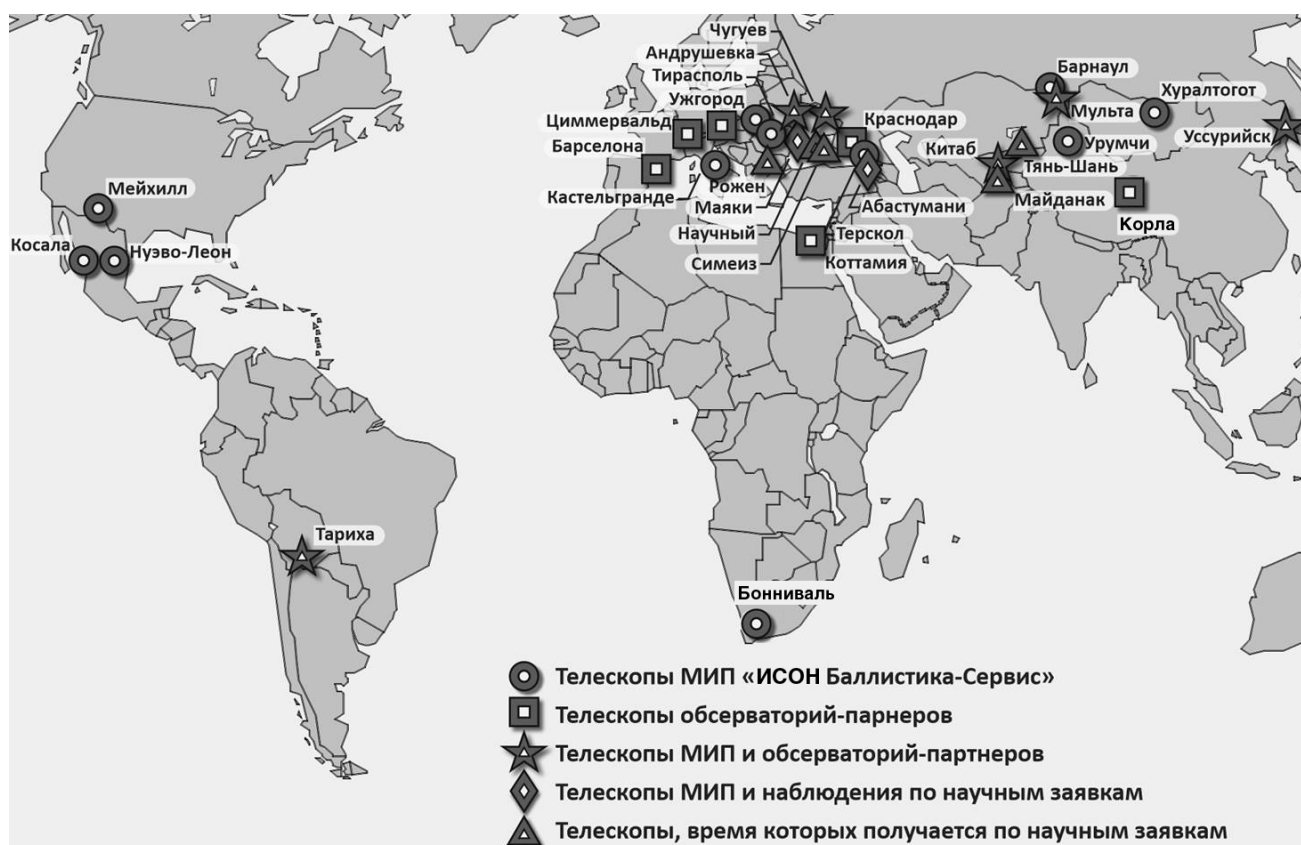


Рис. 1: Географическое расположение обсерваторий, вовлеченных в проект ИСОН.

ганизациями. В 2021 году к сети добавились 3 новые обсерватории — Модра в Словакии (20 см телескоп Целестрон), Бонниваль в ЮАР (22 см телескоп CPT-220, перемещенный из Пулковской обсерватории) и Корла в Китае (36 см телескоп китайской разработки). Несколько ранее начались совместные работы с обсерваторией Коттамия в Египте (28 см телескоп Целестрон) [6]. Проводятся ремонтно-восстановительные работы в обсерваториях сети (сокращение финансирования привело к прекращению наблюдений 50% обсерваторий ИСОН), а также повышение степени автоматизации телескопов (устанавливаются фокусируемые устройства собственной разработки).

Обновленную сеть ИСОН составляют 32 телескопа МИП в 19 наблюдательных пунктах и 12 инструментов 10 обсерваторий-партнеров, заключивших договора о научно-техническом сотрудничестве с МИП «ИСОН Баллистика-Сервис». Кроме того, наблюдательные программы ИСОН реализуются еще на 10 более крупных телескопах, на которых наблюдательное время получается по научным заявкам. Географическое расположение и названия 30 обсерваторий, участвующих в сети ИСОН показано на рис. 1.

В рамках ИСОН воссоздана обзорно-поисковая сеть, реализующая с использованием телескопов VT-78a (в Уссурийске, Хуралтоготте, Мульте и Тирасполе), ORI-22 (в Китабе, Абастумани, Андрушевке и Кастильгранде), ORI-25 (в Урумчи, Чугуеве, Тирасполе, Косале и Нуэво-Леоне) принцип т.н. "сплошных" обзоров в широкой полосе 18 градусов [1]. С ее помощью решается задача обнаружения и сопровождения всех ГСО-объектов с блеском ярче $15,5^m$ с целью самостоятельного ведения каталога, обеспечивая полное перекрытие ГСО.

4. Результаты наблюдений космического мусора

Поскольку в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН ежедневно рассчитываются прогнозы опасных сближений для ЦУП ЦНИИмаш, то в базу данных ИПМ попадают помимо измерений ИСОН и данные обсерваторий Роскосмоса. На рис. 2 показано изменение количества космических объектов (КО) в базе данных ИПМ по годам по типам орбит.

На конец 2021 года база данных ИПМ им. М.В. Келдыша РАН содержала орбитальную информацию по 7829 КО (2537 ГСО, 4753 ВЭО и 539 СВО). Распределение этих КО по величине блеска представлено на рис. 3.

С использованием телескопов апертурой 40 — 80 см были отработаны методы обнаружения и сопровождения слабых ГСО-объектов. Эти работы позволили впервые в России открыть малоразмерные фрагмен-

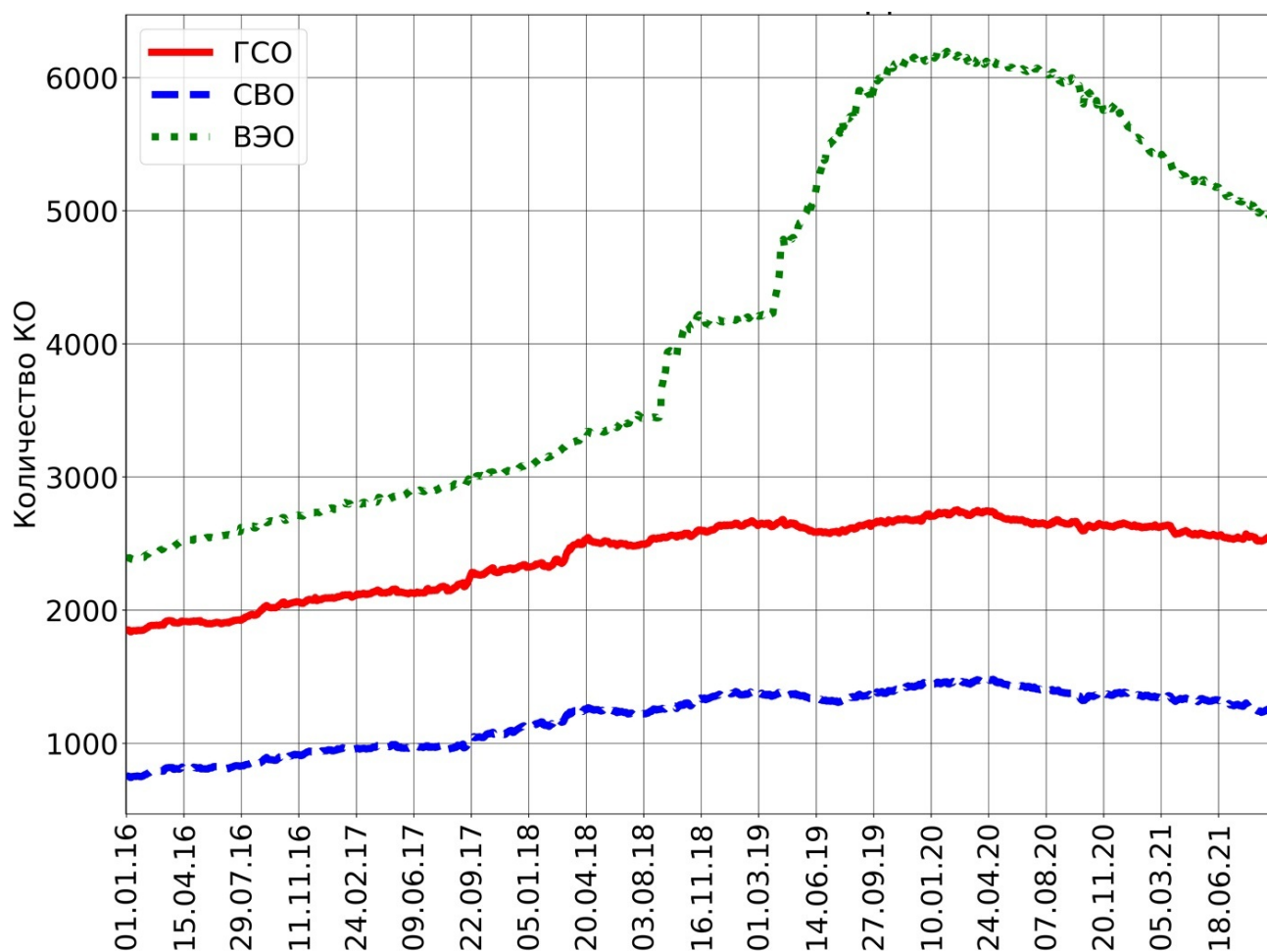


Рис. 2: Изменение количества КО в базе данных ИПМ по годам (2016–2021) по типам орбит — ГСО, высокоэллиптических (ВЭО) и средневысоких (СВО).

ты космического мусора на высоких орбитах и подтвердить наличие облаков фрагментов на ГСО и ВЭО, порожденных разрушениями спутников и ступеней ракет. Впервые в мире было отработано сопровождение объектов с большим отношением площади к массе на длительных интервалах времени, что позволило реконструировать их орбиты, проанализировать баллистическую эволюцию и определить источники образования. По оценкам [7], объекты с отношением площади к массе больше $1 \text{ м}^2/\text{кг}$ составляют не менее половины популяции фрагментов космического мусора на высоких орбитах. В базе данных сопровождается 1377 подобных КО (516 ГСО, 770 ВЭО и 91 СВО), что составляет 17,6% известной популяции. Распределение этих КО по величине отношения площади к массе представлено на рис. 4.

Из рис. 2 видно, что состояние каталога начало ухудшаться, начиная с января 2020 г. Одной из причин этого является деградация сети ИСОН. Вместе с тем, качество каталога ярких ГСО-объектов, на которые приходится подавляющее большинство опасных сближений, продолжает оставаться хорошим — см. рис. 5. Кривыми разного цвета обозначены - общее количество ярких (до $15,5^m$) 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. Видно, что регулярно получаются измерения по 90% ярких каталогизированных КО, Поэтому орбиты большинства КО имеют хорошую точность и разница между общим количеством КО и КО с точными орбитами (между зеленой и красной кривыми) — минимальная. Точные орбиты имеют 98% популяции. В связи с этим каталог в части ярких ГСО-объектов может использоваться для достоверных прогнозов опасных сближений.

Данные с 80-см телескопа К-800 на пике Терскол используются для верификации модели ненаблюдаемой фракции КМ, развиваемой в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН [8].

5. Направления развития ИСОН

В настоящее время вклад ИСОН уменьшился до 5% от общего объема измерений, получаемых ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Поэтому для возобновления интереса к сети со стороны отечественных заказчиков, необходимо существенно увеличить производительность сети. Первоначально такие ожидания были связаны

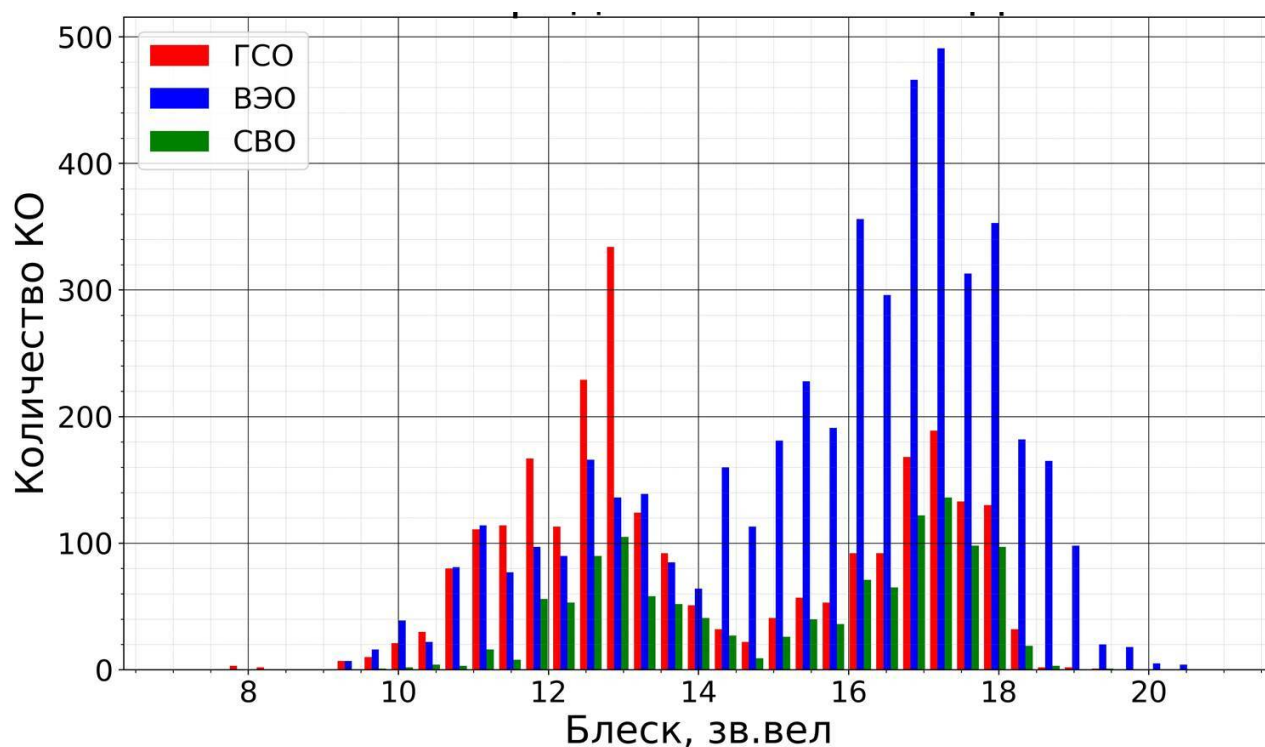


Рис. 3: Распределение КО на ГСО, ВЭО и СВО по величине блеска.

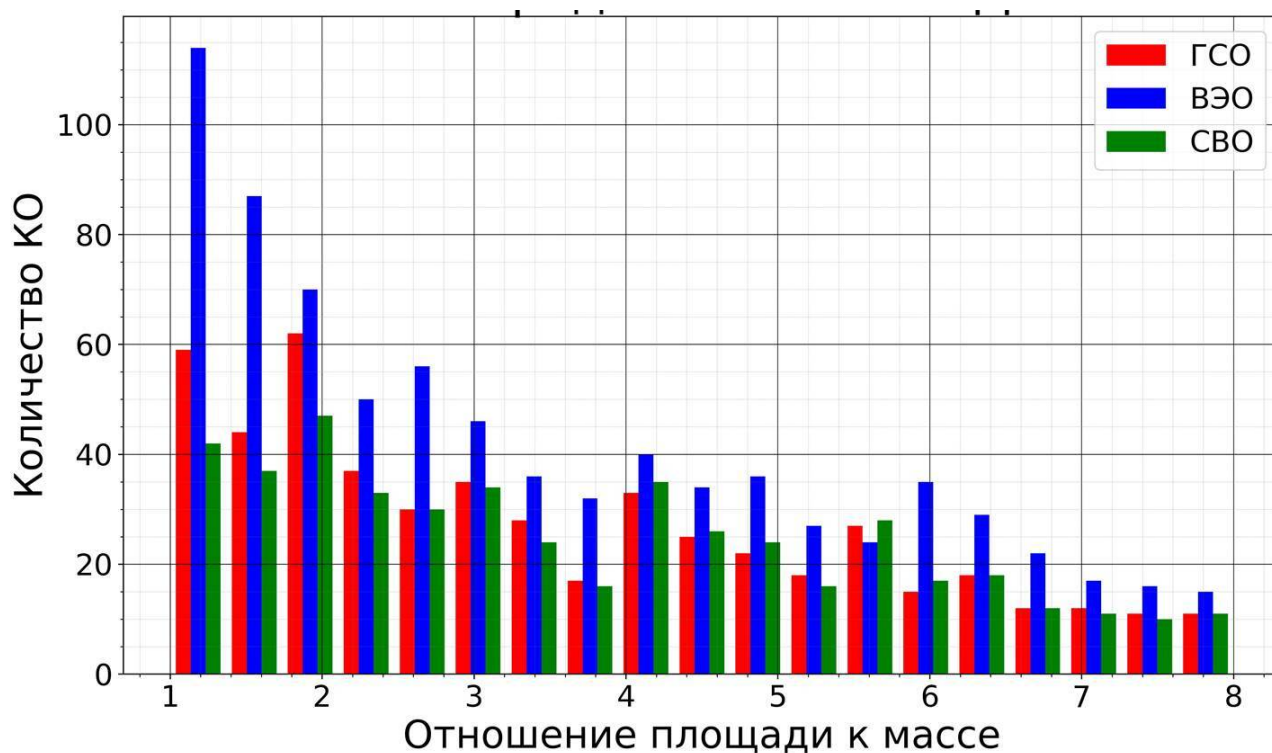


Рис. 4: Распределение КО на ГСО, ВЭО и СВО по величине отношения площади к массе.

с вводом в строй нового 40-см телескопа САНТЕЛ-400з в Мульте с полем зрения $4 \times 5,5$ градусов. С его помощью предполагалось производить полные глубокие обзоры ГСО с детектированием фрагментов до 17^m . Но, пока не удалось достигнуть равномерного качества изображения по всему полю зрения, поэтому его производительность даже меньше, чем у одиночного телескопа VT-78a – см. табл. 2.

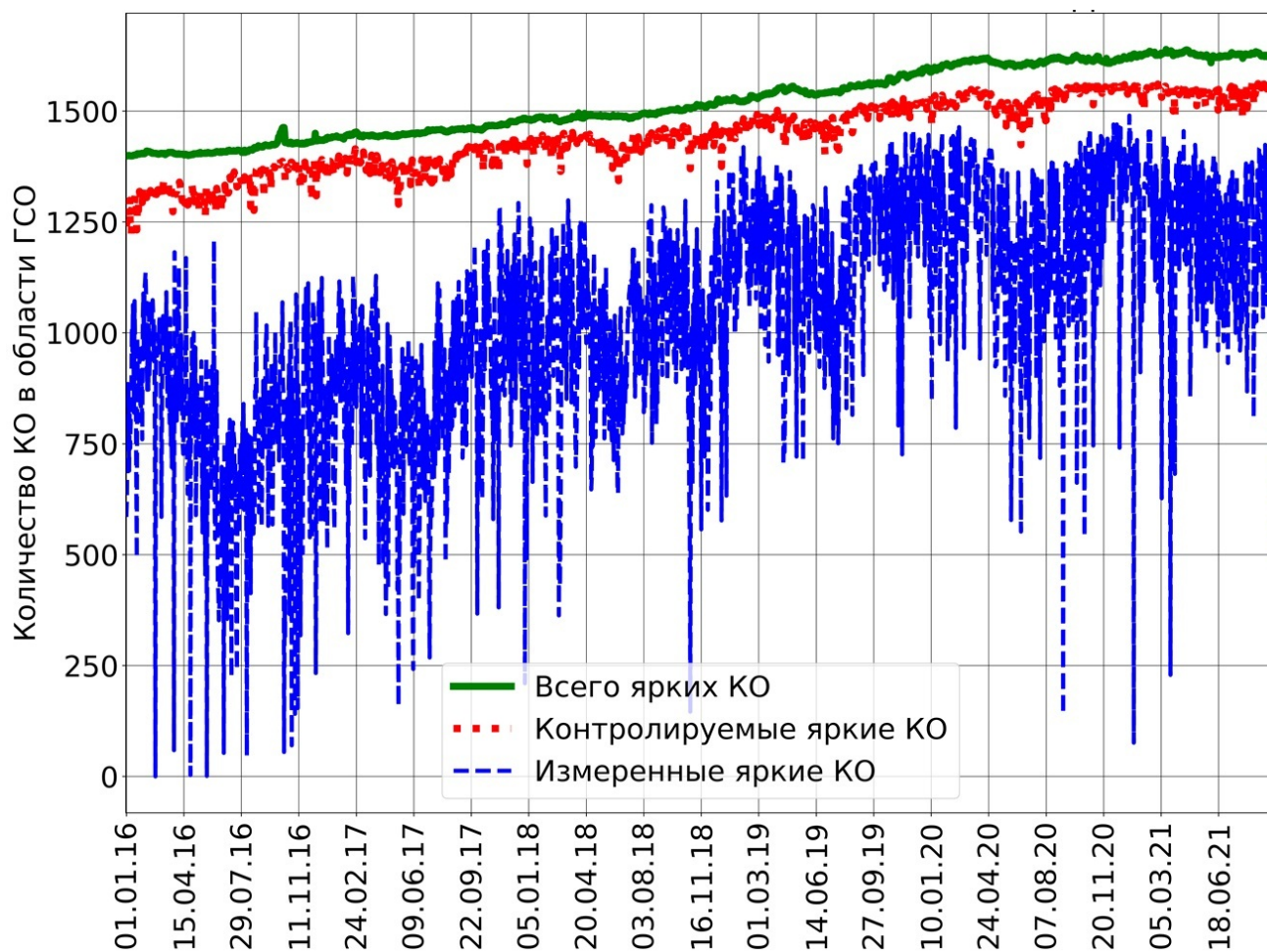


Рис. 5: Состояние каталога ярких ГСО-объектов.

Название	Апертура, см	ПЗС-чип, мм	Поле зрения, град	Измерений	Проводок	КО
ЭОС-15	4x19.2	36x24	9x14	66000	7500	1200
Сова-25	2x25	50x50	7x14	34000	5000	980
VT-78a	19.2	36x36	7x7	14500	2250	488
Сантел-400з	40	50x36	4x5.5	5765	934	409

Таблица 2: Сравнение производительности обзорных оптических комплексов.

Как видно из табл. 2, наибольшая производительность у 4-х трубного комплекса ЭОС-15 ЭОП-2 и у 2-х трубного комплекса Сова-25 ОЭЖ ОКМ, см. на рис. 6 их сравнение по количеству и блеску измерений.

6. Заключение

В 2004-2011 гг. в рамках проекта ПулКОН/НСОИ АФН/ИСОН была создана глобальная кооперация обсерваторий, впервые в стране перекрывшая наблюдениями всю ГСО. Проект ИСОН стал инкубатором инновационных решений в области мониторинга высоких околоземных орбит, которые были внедрены при создании обсерваторий Роскосмоса и организаций промышленности.

С 2019 г. началось ухудшение параметров сети ИСОН, что потребовало поиска новых организационных решений. ИСОН начала финансироваться за счет грантов и зарубежных договоров через ООО МИП «ИСОН Баллистика-Сервис», что позволило возобновить развитие сети. Пробные наблюдения были проведены в 4-х новых обсерваториях в ЮАР, Китае, Египте и Словакии.

С января 2020 г. началось ухудшение параметров каталога – в особенности снизилось количество ВЭО-объектов. На конец 2021 года в базе данных ИПМ им. М.В. Келдыша РАН поддерживались орбиты 7829 КО (2537 ГСО, 4753 ВЭО и 539 СВО), в том числе 1377 с большим отношением площади к массе. При этом 98% орбит ярких ГСО-объектов сохраняют высокую точность.

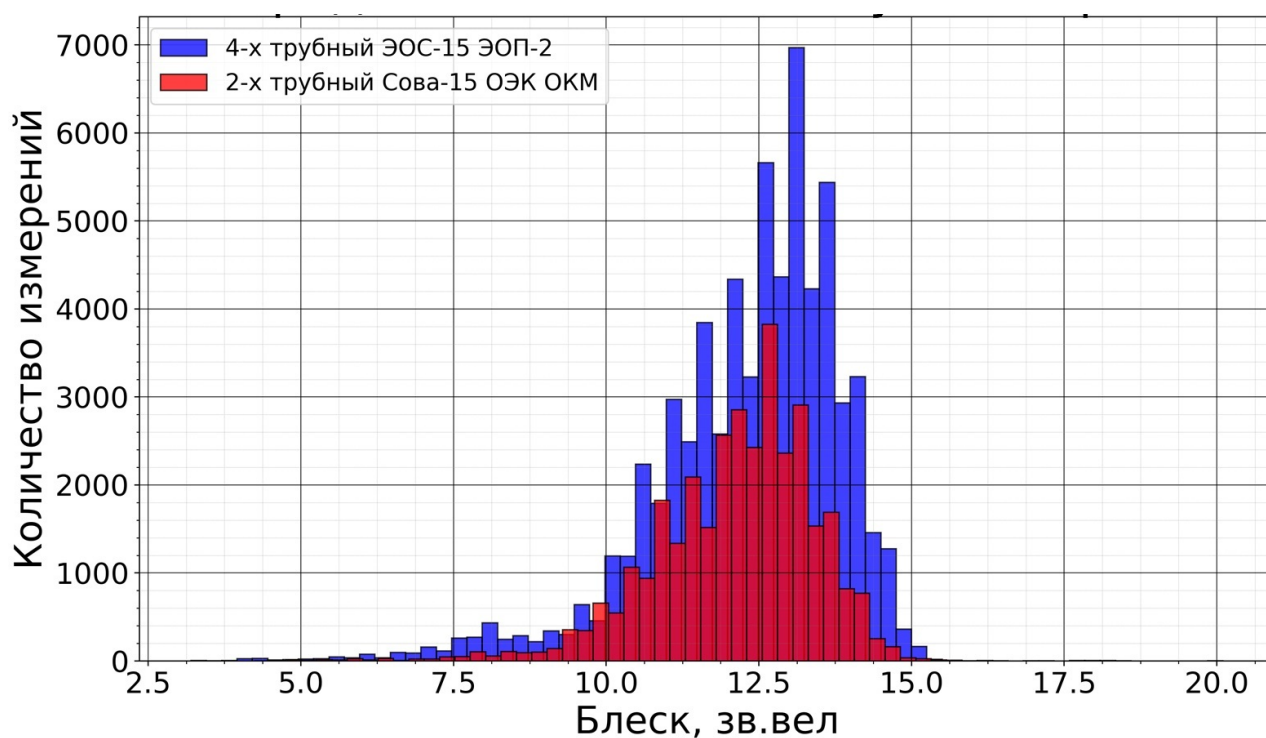


Рис. 6: Распределение КО на ГСО, ВЭО и СВО по величине отношения площади к массе.

Параметры каталога планируется улучшить путем развития сети ИСОН, предполагается разработать и изготовить 3 высокопроизводительные системы – один 4-х трубный комплекс с полем зрения $7 \times 10,5$ градусов и два 2-х трубных комплекса с полем зрения 6×12 градусов.

Список литературы

1. И. Е. Молотов, В. А. Воропаев, А. Н. Юдин, Д. Е. Иванов, Е. А. Аистов, and Г. К. Боровин, *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*, **2**, 110, 2017.
2. V. Kouprianov and I. Molotov, in T. Flohrer and F. Schmitz, eds., *Proc. 7th European Conference on Space Debris, Darmstadt, Germany*, volume 7 (2017).
3. Л. Еленин and И. Молотов, *Известия РАН. Теория и системы управления*, 83–95, 2020.
4. В. Д. Шилин, А. П. Лукьянов, И. Е. Молотов, В. М. Агапов, and А. Е. Колесса, *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*, **4**, 171, 2013.
5. А. П. Лукьянов, В. Н. Лагуткин, М. А. В., А. Е. Колесса, et al., *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*, **4**, 101, 2013.
6. A. M. Abdelaziz, S. K. Tealib, and M. I., *Astrophysics and Space Science*, **366**, 2021.
7. В. М. Агапов, И. Е. Молотов, Г. К. Боровин, and А. И. Стрельцов, *Инженерный журнал: наука и инновации*, **98**, 1, 2022.
8. Г. К. Боровин, М. В. Захваткин, В. А. Степаньянц, and И. В. Усовик, *Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша*, **85**, 2018.