

УДК 520.8

АНАЛИЗ ВКЛАДА ОПТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НАБЛЮДЕНИЯ РАН В КОНТРОЛЬ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА В 2016–2017 ГГ.

Хуторовский З. Н., Лукьянов А. П., Шилин В. Д., Колесса А. Е.,
Шпитальник М. Ц., Сорокин К. В.

ANALYSIS OF CONTRIBUTION OF OPTICAL OBSERVATORIES OF RUSSIAN
ACADEMY OF SCIENCES TO SPACE SURVEILLANCE IN 2016–2017

Khutorovsky Z. N., Lukyanov A. P., Shilin V. D., Kolessa A. E., Shpitalnik M. Ts.,
Sorokin K. V.

Public Corp. “МАК Vympel”, Moscow, 125480, Russia
e-mail: kikkolo@mail.ru

Abstract. Optical measurements take an important part in the solving the main problem of near-Earth space control: maintaining the catalogue of space objects. Space objects considered depending on their size (magnitude), their support type and type of orbit. The article presents the main results of the optical network for 2016–2017. The main problems of analysis of effectiveness of near-Earth space objects measurements by telescopes, and its current state are considered. The performance indicators are calculated using a new algorithm being developed in JSC Vimpel. In this article, telescopes a grouped according to their belonging to the operator organization.

Keywords: space objects, Low Earth orbit (LEO), High Earth orbit (HEO), a network of telescopes, task management, calculation of efficiency, performance indicators, space surveillance catalogue.

Введение

Измерительные средства, используемые при контроле космического пространства делятся на собственные и привлекаемые. Оптические средства (ОС) РАН вместе со средствами Роскосмоса, организаций промышленности, вузов, входят в число привлекаемых. Привлекаемые средства участвуют в решении одной из наиболее важных задач контроля космического пространства — поддержании каталога космических объектов [1].

Характеристиками качества решения задачи поддержания каталога являются полнота, точность и оперативность. Задачей привлекаемых оптических средств является под-

держание этих характеристик на максимально возможном уровне.

1. Классы и категории обслуживаемых КО

При контроле космического пространства обслуживаются космические объекты (КО) на высотах до 50 000 км в апогее. По параметрам орбиты обслуживаемые КО подразделяются на классы, представленные на рис. 1.

Каталогизированный КО имеет категорию сопровождаемого, если его «местонахождение известно», т.е. новая информация практически безошибочно привязывается к КО и позволяет уточнить его орбиту. Информация

Хуторовский Захарий Наумович, д-р техн. наук, главный конструктор информационно-аналитического центра ПАО «МАК “Вымпел”»; e-mail: hzn40@mail.ru.

Лукьянов Александр Петрович, д-р техн. наук, доцент кафедры «Информационные системы» факультета радиотехники и кибернетики Московского физико-технического института, заместитель главного конструктора информационно-аналитического центра ПАО «МАК “Вымпел”»; e-mail: kikkolo@mail.ru.

Шилин Виктор Дмитриевич, канд. техн. наук, главный конструктор системы контроля космического пространства РФ, ПАО «МАК “Вымпел”»; e-mail: vimpel@vimpel.ru.

Колесса Алексей Евгеньевич, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Информационные системы» факультета Радиотехники и кибернетики Московского физико-технического института, начальник научно-технического центра ПАО «МАК “Вымпел”»; e-mail: kolessa@yandex.ru.

Шпитальник Михаил Цаликович, начальник сектора ПАО «МАК “Вымпел”»; e-mail: vimpel@vimpel.ru.

Сорокин Кирилл Владимирович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник ПАО «МАК “Вымпел”»; e-mail: k.sorokin@mail.ru.

Работа была частично поддержана программой 5-100 Российской Федерации в Московском физико-техническом институте.

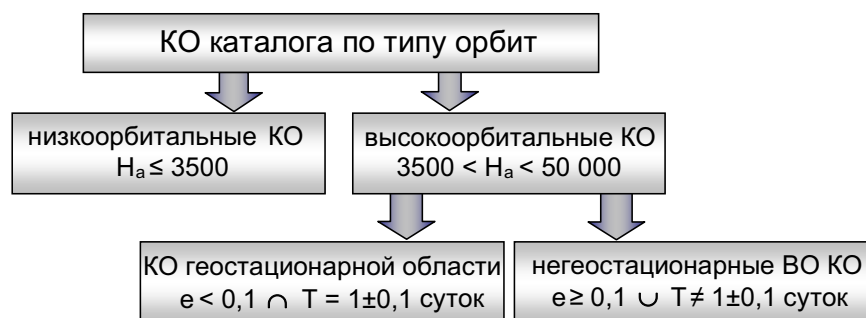


Рис. 1

поступает от измерительных средств, либо из сторонних источников (например элементы орбит в формате TLE, “two-line element”, публикуемые в сети internet). Возможно сопровождение КО лишь по сторонним данным, однако интерес представляют только КО с измерительной информацией. Такие объекты могут принадлежать к категориям измеренных и контролируемых КО.

Измеренным группой средств на определенном интервале времени называется сопровождаемый КО, по которому на этом интервале есть хотя бы одно измерение от этой группы.

Измеренный КО называется контролируемым группой средств, если для его сопровождения достаточно измерений от этой группы.

2. Привлеченные оптические средства

Для решения задач контроля космического пространства привлекаются оптические средства следующих эксплуатирующих организаций [2]: Роскосмос, Астрономический научный центр (АНЦ), ПАО «МАК “Вымпел”», Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша (ИПМ РАН), Институт астрономии (ИНАСАН), Институт солнечно-земной физики (ИСЗФ СО РАН), Уральский государственный университет (УрГУ РАН).

От РАН в 2016–2017 гг. привлекалось 19 телескопов, эксплуатируемых ИПМ, 2 телескопа ИНАСАН, 1 телескоп ИСЗФ и 1 телескоп УрГУ.

3. Полнота контроля в классах и категориях КО

При анализе вклада оптического средства традиционно используются различные статистические показатели, дающие лишь частичную оценку [3].

Так, показатели времени работы (число ночей, время работы за ночь и др.) и производительности (число засечек, проводок, длительность проводки и др.) не характеризуют эффективность. Телескоп может за ночь выполнять измерения по всего одному яркому геостационарному КА с точной орбитой, и показатели будут высокими.

Число измеренных и контролируемых КО в различных классах являются важным количественным показателем полноты решения задачи поддержания каталога. Однако они характеризуют вклад средств лишь частично. Важно учитывать, какие КО измеряются: чем больше ошибка определения текущего положения КО, тем ценнее измерение. Измерение большого числа ярких КО с точно известными орбитами не эффективно.

Помесячное изменение этого показателя во времени с января 2016 г. по июнь 2017 г. для КО геостационарной области (ГС КО) и негеостационарных высокоорбитальных КО (НГС ВО КО) представлено на рис. 2–5. Средства РАН измеряют (контролируют) ~ 80 % ГС КО, измеряемых (контролируемых) всеми привлекаемыми средствами. По НГС КО эта цифра существенно меньше: ~ 30 % для измеренных и ~ 20 % для контролируемых.

4. Обнаружение неизвестных КО

Обнаружение неизвестных КО — неотъемлемая часть процесса поддержания каталога. С одной стороны, по различным причинам возникают перерывы в измерениях по КО каталога. С другой, постоянно появляются отсутствующие в каталоге КО, доступные для наблюдения оптическими средствами. Первое обстоятельство приводит к необходимости обнаружения потерянных КО, второе — к необходимости обнаружения новых КО.

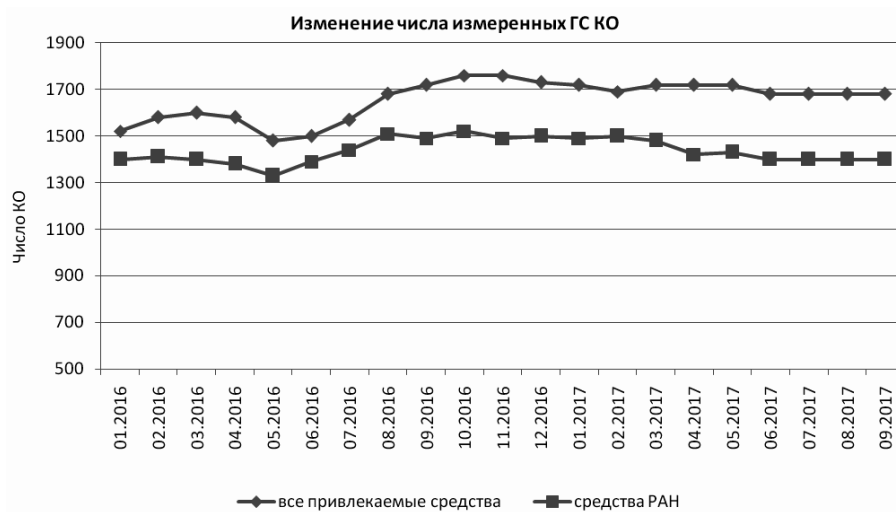


Рис. 2. Изменение числа измеренных ГС КО по месяцам

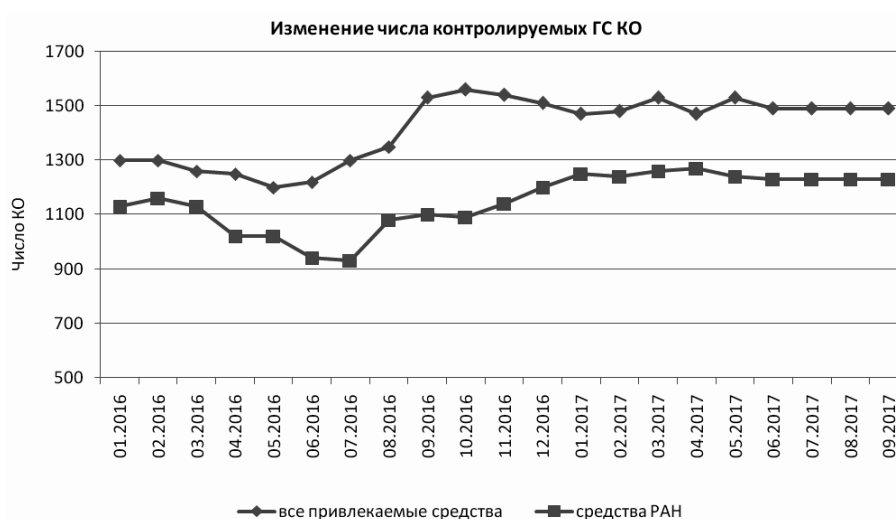


Рис. 3. Изменение числа контролируемых ГС КО по месяцам

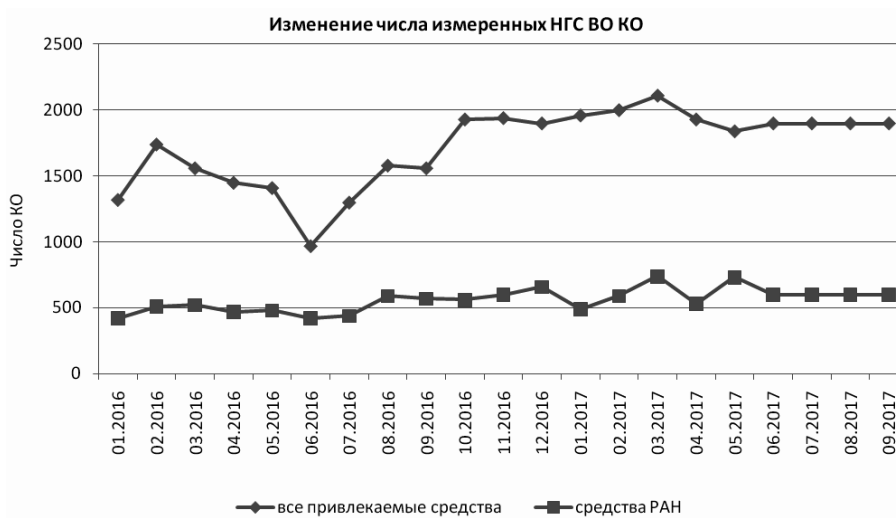


Рис. 4. Изменение числа измеренных НГС ВО КО по месяцам



Рис. 5. Изменение числа контролируемых НГС ВО КО по месяцам



Рис. 6. Изменение числа обнаруженных неизвестных КО по месяцам

На рис. 6 приведено помесечное изменение числа неизвестных (новых или потерянных) КО с января 2016 г. по июнь 2017 г. по данным привлекаемых оптических средств.

Как можно видеть, привлекаемыми оптическими средствами было обнаружено 1471 неизвестных КО. В 614 случаях (42 %) в обнаружении принимали участие оптические средства РАН.

5. Эффективность поддержания каталога КО

Представленные в разделах 3 и 4 данные являются показателями полноты каталога, в целом характеризующими процесс обнаружения-сопровождения. Но эффективность поддержания каталога они характери-

зуют не полностью. Не оценивается вклад в точность определения положения КО. Разные КО между собой никак не отличаются, что неверно [4, 5]. Желательно иметь единый показатель вклада в процесс поддержания каталога определённой группы телескопов на определённом интервале времени.

Для более полного и удобного учёта комплекса требований к поддержанию каталога, в ПАО «МАК «Вымпел» разработана методика, позволяющая сравнить в целом вклад в решение задачи поддержания каталога КО различных оптических групп телескопов с помощью только одного показателя — эффективности.

В методике определяется в условных единицах ценность каждого оптического измере-

ния, а ценность определённой совокупности измерительной информации складывается из ценности каждого измерения, входящего в эту совокупность. При расчёте ценности измерения учитываются следующие факторы:

- достоверность и представительность выполненного измерения;
- точность измерения;
- уменьшение ошибки вдоль орбиты после уточнения по измерению;
- уточнение параметров формы орбиты по измерению;
- оперативность получения измерения потребителем;
- участие в обнаружении новых и потерянных КО;
- участие в важных работах (запуск важного КО, опасное сближение и др.).

Идея предлагаемого методикой способа оценки эффективности конкретного измерения состоит в следующем.

Если по измерениям текущее положение КО определяется достаточно точно (КО попадает в центр кадра при наведении телескопа), новые измерения и уточнение не требуются. Чем больше ошибка расчёта текущего положения КО, тем важнее иметь измерения, позволяющие ее уменьшить. Таким образом, ценность измерения тем больше, чем больше расстояние от точки ожидаемого появления КО (часто центр кадра) до точки обнаружения КО. Измерения по потерянному КО (с большой ошибкой положения) или отсутствующему в каталоге КО (нельзя определить положение) представляют максимальную ценность.

Важно, как долго после уточнения орбиты КО не будет потерян при отсутствии измерений. Поэтому ценность измерения зависит и от ошибки уточнённого по нему текущего положения КО.

Приведём алгоритм расчёта эффективности решения задачи поддержания каталога $P_{эф}$ заданной группы телескопов на заданном временном интервале.

$P_{эф}$ складывается из трёх составляющих — $P_{эф,сопр}$, $P_{эф,обн}$, $P_{эф,важ}$. Разберем каждую составляющую.

1) $P_{эф,сопр}$ — показатель, характеризующий участие в сопровождении каталогизированных КО для группы телескопов на заданном временном интервале, складывающийся из показателей каждого телескопа и каждой ночи. В свою очередь, показатель $P_{эф,сопр}$

конкретного телескопа за конкретную ночь складывается из показателей эффективности $P_{эф,изм}$ измерений за ночь, привязанных к КО каталога. Измерением будем называть группу угловых засечек с одним присвоенным на средстве номером.

Величина $p_{эф,изм}$ для каждого конкретного измерения считается по формуле

$$p_{эф,изм} = k(t_{сп}, P)k_1(e)k_2(\Delta u)q_{эф},$$

где

$$q_{эф} = \min(\max(|\Delta_{пр}|, 0,3), 100), \quad (5.1)$$

$$\text{при } t_{изм} \geq t'_{изм}, t'_{изм} \geq t'_{орб};$$

$$q_{эф} = \min(\max(|t_{изм} - t'_{изм}|, 0,3), 100), \quad (5.2)$$

$$\text{при } t_{изм} \geq t'_{изм}, t'_{изм} < t'_{орб};$$

$$q_{эф} = 0,1, \text{ при } t_{изм} < t'_{изм};$$

$$k(t_{сп}, P) = 0,5, \text{ при } t_{сп} < 5P';$$

$$k(t_{сп}, P) = 1,0, \text{ при } 5P' \leq t_{сп} < 10P';$$

$$k(t_{сп}, P) = 1,0 + 0,5 \frac{t_{сп} - 10P'}{10P'},$$

$$\text{при } 10P' \leq t_{сп}.$$

Здесь

– $t_{изм}$ — время измерения (размерность сутки);

– $t'_{изм}$, $t'_{орб}$ — времена последнего измерения и орбиты КО в БД перед записью в БД результатов обработки измерения (сутки);

– $\Delta_{пр}$ — невязка вдоль орбиты измерения и спрогнозированной на момент $t_{изм}$ орбиты КО, привязанной к моменту $t'_{орб}$, (угловые минуты);

– $t_{сп}$ — время сопровождения (длина проводки) КО на средстве (минуты);

– P — период обращения КО на орбите (минуты), $P' = P/1436$;

– $k_1(e) = 1 + c_e e(\pi - |\theta|)$, где e — эксцентриситет орбиты, θ — угловое расстояние места наблюдения от перицентра (радианы), $c_e = 1$ (константа, которая может быть изменена);

– $k_2(\Delta u) = c_u \Delta u_{послеут} / \Delta u_{доут}$, где $\Delta u_{доут}$ и $\Delta u_{послеут}$ — длина дуги при определении орбиты по измерениям без данного и включая данное, $c_u = 1$ (константа, которая может быть изменена).

Замечание. Если бы все КО в БД имели только измерительную информацию, время последней орбиты не могло опережать время последнего измерения, и для расчёта $q_{эф}$ использовалась формула (5.1). При наличии

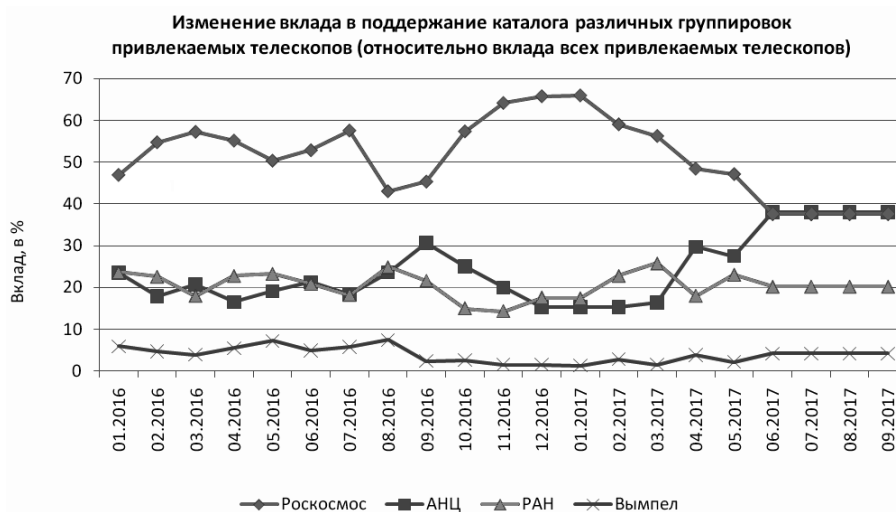


Рис. 7. Изменение вклада в поддержание каталога различных групп привлекаемых телескопов (в процентах относительно вклада всех привлекаемых телескопов) по месяцам

сторонней информации опережение возможно. Но ценность измерения определяется положением на временной оси при определении орбиты КО, поэтому при таком опережении для расчёта $q_{эф}$ используется формула (5.2).

2) $P_{эф,обн}$ — показатель, характеризующий участие в обнаружении новых и потерянных КО. Если измерения хотя бы одного телескопа заданной группы участвовали в обнаружении КО на задаваемом временном интервале при отсутствии априорной информации, $P_{эф,обн}$ увеличивается на задаваемую константу (принято значение 150).

3) $P_{эф,важ}$ — показатель, характеризующий участие в важных работах: обнаружении запущенных КО без априорной информации (например, без ТЛЕ), сопровождение КА на важном участке полёта (КА в аварийной ситуации, манёвр КА без ТЛЕ, крупный КА менее чем за месяц до сгорания, особо опасное сближение и др.). За участие хотя бы одного телескопа группы в каждой такой работе в каждый день на задаваемом временном интервале $P_{эф,важ}$ увеличивается на задаваемую константу (принято значение 50).

Интерес представляют относительные значения показателя эффективности для различных совокупностей измерений, позволяющие провести сравнение. В дальнейшем именно они будут пониматься под терминами «эффективность» или «вклад».

На рис. 7 приведено ежемесячное изменение вклада групп телескопов различных эксплуатирующих организаций. За 100 % принят

вклад всех привлекаемых средств. Вклад телескопов РАН составляет в среднем $\sim 20\%$. Основной вклад вносят телескопы Роскосмоса и АНЦ, эксплуатацию которых осуществляет АНЦ.

На рис. 8 приведено ежемесячное изменение вклада для телескопов различных организаций РАН. Вклад телескопов УрГУ составил менее 0,1 %. В среднем за 18 месяцев 2016 и 2017 гг., вклад телескопов ИПМ, ИСЗФ и ИНАСАН составил 13,7 %, 4,3 % и 1,6 % соответственно.

Вклад телескопов внутри группы различный. В среднем за 18 месяцев 2016 и 2017 гг. вклад телескопов, эксплуатируемых ИПМ, составил: АТ-64 в Научном-1 (Крым) — 42,2 %, 3 телескопа в Уссурийске (ОРИ-22, ГАЗ-250, ВТ-78а) — 14,7 %, РК-800 в Терсколе — 13,2 %, ОРИ-25 в Мексике — 12,3 %, ОРИ-25 в Боливии — 5,9 %, ОРИ-22 в Абастумани (Грузия) — 3,8 %, 2 телескопа в Мульте (ВТ-78а и СШС-22) — 3,9 %, ВТ-78а в Монголии — 2,4%, ОРИ-22 в Китабе (Узбекистан) — 2,3 %, ОРИ-22 в Андрушевке (Украина) — 1,9 %, ОРИ-25 в Тирасполе (Молдавия) — 1,2 %, остальные — каждый менее 1 %. Из двух телескопов ИНАСАН наиболее эффективен Цейсс-2000 в Терсколе. Его эффективность примерно на порядок выше, чем у телескопа САНТЕЛ-500А в Звенигороде.

Заключение

В 2016–2017 гг. телескопы, эксплуатируемые организациями РАН, принимали уча-

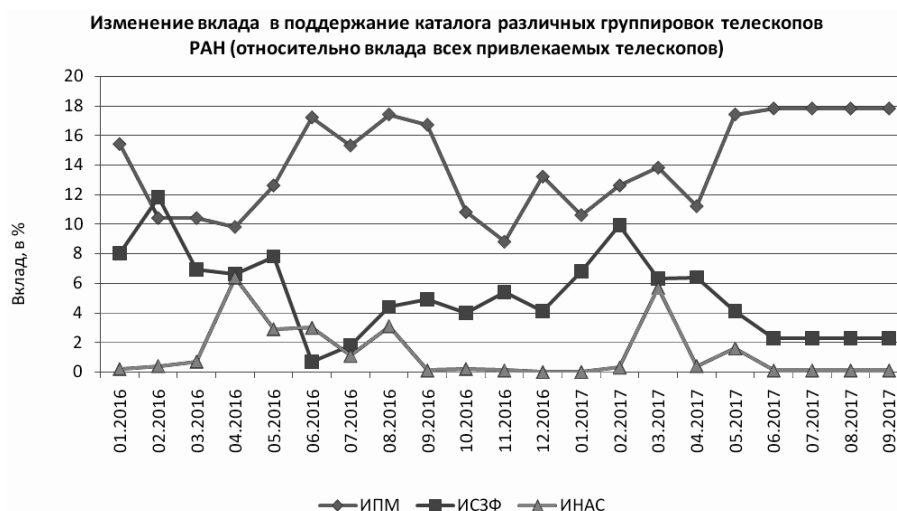


Рис. 8. Изменение вклада в поддержание каталога различных групп телескопов РАН (в процентах относительно вклада всех привлекаемых телескопов) по месяцам

стие в решении задач контроля космического пространства. Их координатная информация внесла существенный вклад в поддержание каталога КО.

Оптические средства РАН в 2016–2017 гг. контролировали ~80 % КО геостационарной области относительно контролируемых всеми привлекаемыми оптическими средствами.

Оптические средства РАН в 2016–2017 гг. измеряли ~30 % негеостационарных высокоорбитальных КО относительно измеренных всеми привлекаемыми оптическими средствами.

Оптические средства РАН в 2016–2017 гг. контролировали ~20 % негеостационарных высокоорбитальных КО относительно контролируемых всеми привлекаемыми оптическими средствами.

Оптические средства РАН в 2016–2017 гг. принимали участие в обнаружении 42 % неизвестных (новых или потерянных) высокоорбитальных КО.

Суммарный вклад измерительной информации телескопов РАН в поддержание каталога в 2016–2017 гг. составлял ~20 % вклада всех привлекаемых средств. Вклад телескопов ИПМ, ИСЗФ и ИНАСАН составлял 13,7 %, 4,3 % и 1,7 % соответственно.

5 телескопов РАН имели более чем 1 % вклад в поддержание каталога КО: АТ-64 в Научном-1 (5,7 %), АЗТ-14 в Мондах (4,3 %), РК-800 в Терсколе (1,8 %), ОРИ-25 в Мексике (1,7 %) и Цейсс-2000 в Терсколе (1,6 %). Из них АТ-64, РК-800 и ОРИ-25 эксплуатирова-

лись ИПМ, АЗТ-14 — ИСЗФ, и Цейсс-600 — ИНАС.

Литература

- Хуторовский З.Н., Бойков В.Ф., Пылаев Л.Н. Контроль космических объектов на низких высотах // Околосемная астрономия (космический мусор). Сб. научных трудов. М.: Космоинформ, 1998. С. 34–101.
- Лукьянов А.П., Лагуткин В.Н., Мальцев А.В., Колесса А.Е., Ким А.К., Равдин С.С., Пругло А.В., Молотов И.Е., Выхристенко А.М., Андрианов Н.Г. Регулярные оптические наблюдения низкоорбитальных спутников в Тирасполе, Кисловодске и Москве в 2012–2013 гг. Первые результаты и перспективы // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2013. Т. 3, № 4. С. 101–105.
- Хуторовский З.Н., Шпитальник М.Ц., Колесса А.Е., Лукьянов А.П. Критерий и анализ эффективности оптических наблюдений космических объектов телескопами ПАО «МАК «Вымпел» // Сборник трудов международной конференции "Околосемная астрономия-2015". 2015. С. 250–255.
- Эльясберг П.Е. Введение в теорию полета ИСЗ. М.: Наука, 1965. 540 с.
- Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: КНОРУС, 2010. 664 с.

References

- Khutorovsky Z.N., Boikov V.F., Pilaev L.N. Low-perigee satellite catalogue maintenance. In: *Near-Earth astronomy (space debris)*. Moscow, Kosmoinform Pub., 1998, pp. 34–101. (In Russian)

2. Lukyanov A.P., Lagutkiy V.N., Mal'tsev A.V., Kolesa A.E., Kim A.K., Ravdin S.S., Prooglo A.V., Molotov I.E., Vikhristenko A.M., Andrianov N.G. Regular optical measurements of LEO-satellites in Tiraspol, Kislovodsk and Moscow in 2013-2014. First results and perspectives. *Ekologicheskii vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva* [Ecological bulletin of reserch centers of Black sea economical cooperation], 2013. vol. 3, no. 4. pp. 101–105. (In Russian)
3. Khutorovsky Z.N., Shpitalnik M.Ts., Kolesa A.E., Lukyanov A.P. Criterea and analisis of effectiveness of space objects measurements by JSC Vimpel telescopes. In: *Proc. Int. conf. "Near-Earth astronomy-2015"*, 2015, pp. 250–255. (In Russian)
4. El'yasberg P.E. *Introduction into the theory of satellite motion*. Moscow, Nauka Pub., 1964, 540 p. (In Russian)
5. Ventzel E.S. *Probability theory*. Moscow, Knorus, 2010, 664 p. (In Russian)

© Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества, 2017

© Хуторовский З. Н., Лукьянов А. П., Шилин В. Д., Колесса А. Е., Шпитальник М. Ц., Сорокин К. В., 2017

Статья поступила 3 ноября 2017 г.