

## ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ УКРАИНСКОЙ СЕТИ ОПТИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ ИССЛЕДОВАНИЯ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

Шульга А.В.<sup>1</sup>, Козырев Е.С.<sup>1</sup>, Сибирякова Е.С.<sup>1</sup>, Кошкин Н.И.<sup>2</sup>, Кара И. В.<sup>2</sup>,  
Благодыр Я.Т.<sup>3</sup>, Вовчик Е.Б.<sup>3</sup>, Епишев В.П.<sup>4</sup>, Кудак В.И.<sup>4</sup>, Рыхальский В.В.<sup>5</sup>,  
Лопаченко В.В.<sup>5</sup>, Кожухов А.М.<sup>5</sup>, Рыщенко С.В.<sup>6</sup>, Мурга В.В.<sup>7</sup>, Кузьков В.П.<sup>8</sup>

<sup>1</sup> НИИ НАО г. Николаев, <sup>2</sup> НИИ АО ОНУ г. Одесса, <sup>3</sup> АО ЛНУ г. Львов,  
<sup>4</sup> ЛКИ УжНУ г. Ужгород, <sup>5</sup> НЦУИКС г. Евпатория, <sup>6</sup> ЦПОСИКНП г. Дунаевцы,  
<sup>7</sup> ГМЦ «Орион», Алчевск, <sup>8</sup> ГАО НАНУ.  
E-mail: avshulga@mail.ru

### Введение

Активное использование околоземного космического пространства привело к существенному увеличению количества искусственных космических объектов (ИКО) в т.ч. космического мусора (КМ). В конце 2010 года, согласно данных отдела NASA по наблюдению искусственных космических объектов в околоземном космическом пространстве (ОКП) насчитывалось порядка 16000 каталогизированных объектов. В связи с увеличением количества КМ и его неуправляемостью, возрастает угроза столкновений КМ с работающими космическими аппаратами. Для предотвращения столкновений необходимо проведение наблюдений всех объектов ОКП. Кроме того важными задачами в изучении ОКП являются также:

- расчет опасных сближений ИКО,
- уточнение теории орбитального движения ИКО,
- исследование формы и параметров собственного вращения отдельных ИКО.

### Украинская сеть оптических наблюдателей

Украинская сеть оптических станций (Українська мережа оптичних станцій – УМОС) создана в 2012 г. для проведения исследований ИКО. Задачами сети являются проведение координатных и фотометрических наблюдений, уточнение элементов орбит ИКО, а также исследование формы и параметров собственного вращения отдельных объектов. На сегодняшний день участниками сети являются:

- Главная астрономическая обсерватория НАН Украины (ГАО НАНУ, г. Киев);
- НИИ Николаевская астрономическая обсерватория (НИИ НАО, г. Николаев);
- НИИ астрономическая обсерватория Одесского Национального Университета (АО ОНУ, г. Одесса);
- астрономическая обсерватория Львовского Национального Университета (АО ЛНУ, г. Львов);
- лаборатория космических исследований Ужгородского национального Университета (ЛКИ УжНУ, г. Ужгород);
- государственный межвузовский центр «Орион» (ГМЦ «Орион», г. Алчевск);
- Национальный центр управления и испытания космических средств (НЦУИКС, г. Евпатория);
- Центр приема и обработки специальной информации и контроля навигационного поля (ЦПОСИ и КНП, г. Дунаевцы).

Размещение станций наблюдений УМОС представлено на рис. 1.



Рис. 1. Размещение наблюдательных станций УМОС

В сети насчитывается 12 автоматизированных телескопов расположенных в 8 обсерваториях Украины. Параметры телескопов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры телескопов, входящих в сеть УМОС

Организация	Телескоп	Объектив F/D [мм]	Поле зрения [°]	Тип координатных наблюдений	Mag <sub>min</sub>
ГАО НАНУ г. Киев	АЗТ-2	5250/700	0.26 × 0.18 0.04 × 0.03	Программное сопровождение ГСС по расчетной траектории	17
НИИ НАО г. Николаев	МОБИТЕЛ КТ-50 [2]	3000/500	0.7 × 0.7	TDI	18
	МОБИТЕЛ ТВТ [2]	135/48	2.6 × 2.0	CCTV	11
	АФУ-75	750/260	2.8 × 2.8	TDI	16
НИИ АО ОНУ г. Одесса	КТ-50	2000/500	0.18×0.14	Сопровождение по видимой траектории	11
АО ЛНУ г. Львов	ЛД-2 (доп. ТВТ)	85/56	4.2 × 3.2	CCTV	11
	ГЛД-250	1250/250	0.4 × 0.3	Суточное ведение телескопа	15
ЛКИ УжНУ г. Ужгород	ТПЛ-1М (доп. ТВТ)	85/56	4.2 × 3.2	CCTV	11
ГМЦ "Орион" г. Алчевск	ТПЛ- 1М (доп. ТВТ)	200/80	1.7 × 1.4	CCTV	10
НЦУИКС г. Евпатория	АЗТ-28	750/230	0.4 × 0.3	Сопровождение по видимой траектории (по датчикам)	11
	АЗТ-8	2800 / 700	0.75×0.75	Суточное ведение телескопа	17
ЦПОСИ и КНП г. Дунаевцы	АЗТ-28	8000/500	0.2 × 0.25	Сопровождение по видимой траектории (по датчикам)	12

## Результаты работы сети УМОС в 2012 г

В 2012 году в рамках функционирования УМОС были выполнены следующие работы:

- формирование списка наблюдаемых ИКО;
- проведение регулярных наблюдений всеми станциями сети;
- организация и поддержка функционирования FTP-сервера;
- формирование каталога положений и элементов орбит ИКО.

Для наблюдений в 2012 г. были сформированы 12 списков ИКО для целей:

- исследования погрешности телескопов входящих в УМОС,
- ведения каталога ИКО УМОС,
- уточнения теории движения ИКО,
- поддержка задач СКАКО,
- поддержка космических миссий, в которых участвует Украина.

По результатам наблюдений за 2012 г. получены 131075 положений 261 ИКО [1]. Данные наблюдений оперативно размещались на ftp-сервере УМОС. Статистика наблюдений для каждой обсерватории УМОС представлена в таблице 2.

Таблица 2 – Статистика наблюдений проведенных сетью УМОС в 2012 году

Обсерватория	К-во ночей	К-во КО	К-во Проводок*	Длительность проводок (мин)	К-во положений
<b>Низкоорбитальные КО (LEO)</b>					
НИИ НАО	33	155	787	3673	38031
НИИ АО ОНУ	68	82	446	1399	30671*
АО ЛНУ	11	61	174	492	1722
ЛКИ УжНУ	5	20	31	82	309
ГМЦ "Орион"	2	12	12	10	68
НЦУИКС	53	9	147	467	22389**
ЦПОСИ и КНП	33	30	185	617	33746**
<b>Всего</b>	<b>127</b>	<b>194</b>	<b>1770</b>	<b>6731</b>	<b>126868</b>
<b>Среднеорбитальные КО (MEO)</b>					
НИИ НАО	9	37	86	6180	391
<b>Геостационарные КО (GEO)</b>					
НИИ НАО	16	29	169	42071	2598
<b>Высокоэллиптические КО (HEO)</b>					
НИИ НАО	4	1	4	756	53
НЦУИКС	20	1	20	2700	1165
<b>Всего</b>	<b>24</b>	<b>1</b>	<b>24</b>	<b>3456</b>	<b>1218</b>
<b>Итого</b>		<b>261</b>			<b>131075</b>

\* - проводка наблюдение КО с одной станции на протяжении прохождения спутником одного витка на орбите

\*\* - проводилось осреднение первичного материала наблюдений на интервале времени в 1 с.

Для контроля погрешности координатных наблюдений на телескопах участников сети проводились наблюдения ИКО, оснащенных уголковыми отражателями. Полученные из наблюдений координаты ИКО сравнивались с эфемеридой International laser ranging service (ILRS). На сайте ILRS приводятся высокоточные

декартовы координаты ИКО. Так как положения спутников даны с некоторым шагом по времени (от 3 до 15 мин.), то вычисление координат на нужный момент времени, при сравнении с наблюдаемыми координатами, производится на основе интерполяционного полинома Лагранжа по 12 опорным точкам [4]. Алгоритм сравнения наблюдений с эфемеридой ILRS включает в себя следующие этапы:

- поиск и загрузка эфемерид для текущего КО и даты наблюдения;
- преобразование трехмерных прямоугольных координат эфемериды из системы ITRS в систему ICRS на эпоху J2000.0;
- внесение поправок в наблюдение за годичную и суточную абберации;
- внесение поправок за планетную абберацию;
- определение прямоугольных координат эфемериды на моменты времени наблюдений с использованием интерполяции Лагранжа по 12 точкам;
- преобразование прямоугольных координат эфемериды в угловые топоцентрические;
- определение разностей между наблюдаемыми и вычисленными угловыми топоцентрическими координатами КО.

В 2012 г. программное обеспечение для интерполяции эфемерид ILRS было модернизировано для работы в автоматическом режиме. Результаты сравнения на примере наблюдений ИКО 16908, полученных в НИИ АО ОНУ, приведены на рис.2. В таблице 3 приведены усредненные значения (O-C) для телескопов каждой обсерватории УМОС.

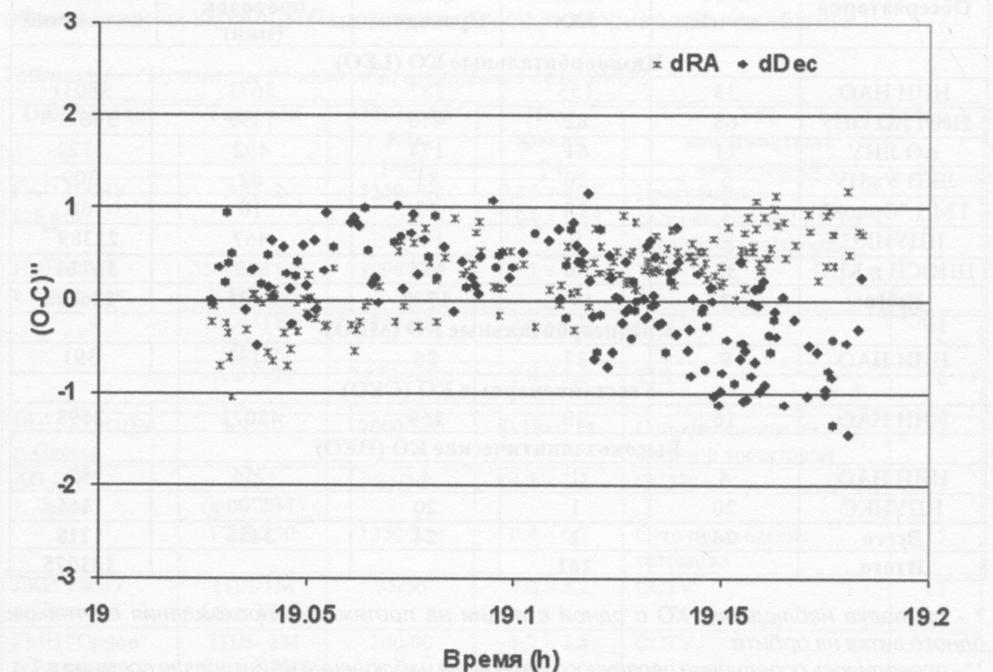


Рис.2. Результаты сравнения наблюдений ИКО 16908, проведенных в НИИ АО ОНУ 21.05.2012 г, с эфемеридой ILRS

Сравнение координат, полученных из наблюдений, с эфемеридой ILRS позволяет выявить и устранить систематические ошибки, связанные с аппаратными задержками засечки времени и процессом вычислений координат.

Массив наблюдений, полученный сетью УМОС в 2012 г., был использован для расчета элементов орбит ИКО. По результатам вычислений сформирован каталог элементов орбит ИКО, который содержит 745 наборов элементов орбит 183 ИКО. Расчет элементов орбиты осуществлялся по результатам наблюдений на протяжении прохождения ИКО одного витка на орбите. Вычисление элементов орбиты включает в себя следующие этапы:

- внесение поправок в положения за годичную и суточную абберации, используются координаты Солнца, вычисляемые с помощью модели движения DE / LE 405.

- расчет начальных элементов орбиты и вектора состояния по трем положениям.

- уточнение вектора состояния методом дифференциальных поправок на основе аналитической модели движения КО (задача двух тел) по всем положениям проводки; в модели учитывается вторая зональная гармоника Земли и Лунно-Солнечные возмущения.

- исключение положений с большими случайными невязками по критерию  $3 \cdot \epsilon$ .

- окончательное уточнение вектора состояния методом дифференциальных поправок на основе численной модели движения, вычисление оскулирующих элементов орбиты и вектора состояния на средний момент наблюдений. Дифференциальные уравнения интегрируются классическим методом Эверхарта 19 порядка с переменным шагом [5].

При вычислении учитывались следующие возмущения:

- гравитационный потенциал Земли до 150 порядка,
- влияние Луны, Солнца, Юпитера и Венеры (в соответствии с моделью движения DE/LE 405),

- приливы в Земной коре (модель Вара),

- световое давление,

- сопротивление атмосферы.

Результатом вычисления являются элементы орбиты и разности между наблюдениями и вычисленной орбитой, которые в дальнейшем рассматриваются как погрешности вычисления положений. Элементы орбит вычисляются в двух системах: Кеплеровы (большая полуось  $a$ , эксцентриситет  $e$ , наклонение  $i$ , аргумент перигелия  $\omega$ , долгота восходящего узла  $\Omega$ , средняя аномалия  $M_0$ ) и вектор состояния ( $X, Y, Z, vX, vY, vZ$ ) [3]. Результатом расчета также являются следующие разности между наблюдениями и вычисленной орбитой:  $dRA$  – по прямому восхождению,  $dDec$  – по склонению,  $dR$  – по дальности. В таблице 3. приведены Результаты сравнения наблюдений телескопов УМОС с эфемеридой ILRS.

### **Выводы.**

В 2012 году завершилось формирование сети УМОС, как кооперативной программы астрономических обсерваторий НАНУ, ГОСИНФОРМНАУКИ, МОН МСУ, ГКАУ. УМОС успешно начала проводить регулярные координатные наблюдения единого списка КО на 10 телескопах 7 обсерваторий Украины. Получен массив 131075 положений 261 ИКО для целей исследования погрешности телескопов входящих в УМОС, ведения каталога ИКО УМОС, уточнения теории движения ИКО, поддержка задач СКАКО, поддержка космических миссий, в которых участвует Украина.

Таблица 3 – Результаты сравнения наблюдений телескопов УМОС с эфемеридой ILRS

Организация	Название телескопа	Метод наблюдения	(O-C) <sub>аб</sub> ["]	СКО <sub>аб</sub> ["]
<b>Низкоорбитальные КО (LEO)</b>				
НИИ НАО	Мобител ТВТ	Комбинированный + НКС [6]	2	3
НИИ НАО	Мобител КТ-50	Комбинированный + УСПЗ [7]	2	0.6
НИИ НАО	АФУ-75	Комбинированный + УСПЗ	5	3
НИИ АО ОНУ	КТ-50	Дифференциальный + механическое сопровождение	0.5	0.5
АО ЛНУ	ЛД-2 (доп. ТВТ)	Комбинированный + НКС	5	5
ЛКИ УжНУ	ТПЛ-1М (доп. ТВТ)	Комбинированный + НКС	-	6
ГМЦ "Орион"	ТПЛ-1М (доп. ТВТ)	Комбинированный + НКС	-	-
НЦУИКС	АЗТ-28	Абсолютный + механическое сопровождение	100	6
ЦПОСИ и КНП	АЗТ-28	Абсолютный + механическое сопровождение	400	4
<b>Высокоорбитальные КО (МЕО, GEO)</b>				
НИИ НАО	Мобител КТ-50	Комбинированный + УСПЗ	0.7	0.3

По данным наблюдений проведен расчет элементов орбит и сформирован каталог, который содержит 745 наборов элементов орбит 183 КО. Данные наблюдений и элементы орбит оперативно размещались на ftp-сервере сети. Определены систематические и случайные погрешности наблюдений для всех телескопов входящих в сеть УМОС.

#### Литература

1. Шульга О.В. Звіт про роботу мережі УМОС у 2012 р. // Бюлетень Українського центру визначення параметрів обертання Землі. – 2012. – № 7, с. 46-48.
2. Шульга А.В., Козырев Е.С., Сибирякова Е.С., Халолей М.И., Чернозуб В.М. Мобильный комплекс телескопов НИИ НАО для наблюдений объектов околоземного космического пространства // Космическая наука и технология – 2012. – Т. 18, № 4. с.52-58.
3. Kara I.V., Kozzyrev Y.S., Sybiryakova Y.S., Shulga O.V. NAO catalog of geocentric state vectors of geosynchronous space objects // Bulletin of the Crimean Astrophysical Observatory, 2011, V. 107, pp. 98–102.
4. Kara I. V. Monitoring the accuracy of observations of passive objects on the basis of the International Laser Ranging Service (ILRS) data. 2010, Odessa Astronomical Publications, vol. 22, p. 20-24.
5. Базей А. А., Кара И. В. Применение методов Эверхарта 15, 17, 19, 21 порядков для вычисления траектории движения небесных тел в околопланетном пространстве // Вестник Астрономической школы. - 2009. - Т.6, № 2. - С.155-157.
6. Козырев Е.С., Сибирякова Е.С., Шульга А.В. Координатные наблюдения низкоорбитальных объектов околоземного космического пространства с использованием режима синхронного накопления телевизионных кадров // Космическая наука и технология. – 2011. – Т. 17, № 3. – С. 83–87.
7. Козырев Е.С., Сибирякова Е.С., Шульга А.В. Исследование точности астрометрической редукции при использовании комбинированного метода наблюдений небесных объектов. // Космическая наука и технология. – 2010. – Т. 16, № 5. – С. 71–76.