

УДК 520.8, 521.97

В. С. Вовк, Е. С. Козырев, Н. А. Куличенко, Е. С. Сибирякова, А. В. Шульга

НДІ «Миколаївська астрономічна обсерваторія»

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РЕГУЛЯРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В НИИ «НИКОЛАЕВСКАЯ АСТРОНОМИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ»

Приводятся результаты наблюдений низкоорбитальных космических объектов комбинированным ПЗС-методом, характеристики точности опорной системы и результаты сравнения полученных положений космических объектов с эфемеридой International Laser Ranging Service.

ВВЕДЕНИЕ

Для осуществления контроля орбит функционирующих КА и предупреждения их столкновений с КМ необходимо регулярно уточнять параметры их орбит, что требует регулярных наблюдений. Наблюдение низкоорбитальных космических объектов (НКО) преимущественно осуществляется радиолокационными станциями (РЛС) с фазированными решетками, способными одновременно сопровождать большое количество объектов, и параболическими антеннами для проведения высокоточных измерений отдельных КО. Оптические телескопы, более дешевые в разработке и эксплуатации, чем радары, используются преимущественно для наблюдения КО на высоких орбитах, так как малоэффективны для наблюдения НКО из-за их большой видимой скорости 0.05–2.0 град/с.

В НИИ «Николаевская астрономическая обсерватория» проблема высокой видимой скорости решена за счет применения оригинальных методов наблюдений, разработанных в обсерватории.

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА

Для наблюдений были задействованы два телескопа, входящие в мобильный комплекс телескопов (МОБИТЕЛ):

- КТ-50 ($D = 500$ мм, $F = 3000$ мм), оснащенный полнокадровой ПЗС-камерой Alta U9000, поле зрения $0.7 \times 0.7^\circ$, предельная звездная величина по опорным звездам 18.5^m с экспозицией 120 с;

- телевизионный телескоп ТВТ ($D = 48$ мм, $F = 135$ мм), оснащенный телевизионной ПЗС-камерой Wattec LCL902H, поле зрения $2.70 \times 2.05^\circ$, предельная звездная величина 12.5 с экспозицией 2.56 с.

Наблюдения НКО проводились с использованием комбинированного метода, который заключается в разделении процессов формирования кадров с изображениями опорных звезд и НКО [7]. Для формирования изображений НКО с помощью телевизионных ПЗС-камер применялся способ накопления кадров со смещением, который заключается в суммировании последовательности кадров со смещением изображения каждого кадра в соответствии с перемещением объекта в поле зрения телескопа [5]. Для формирования изображений НКО с помощью полнокадровых ПЗС-камер применялся режим работы ПЗС-камеры time delay and intergration (TDI) в укороченном виде [2]. Так как обязательным условием применения TDI является установка столбцов ПЗС-матрицы параллельно направлению движения наблюдаемого объекта, для наблюдений использовалось специальное устройство — поворотная платформа (rotator), ко-

торая вращает ПЗС-камеру вокруг оптической оси объектива.

Наблюдательный список состоял из НКО с высотой орбиты от 400 км до 2800 км. Для исследования возможности наблюдения малоразмерных НКО в наблюдательный список телескопа ТВТ была включена группировка легких миниспутников дистанционного зондирования Земли RAPIDEYE с габаритами $1.17 \times 0.78 \times 0.94$ м и массой 150 кг. В наблюдательный список телескопа КТ-50 были включены наноспутники формата CubeSat, имеющие кубическую форму, размер 10–20 см и массу 1–12 кг. Для осуществления контроля погрешности получаемых положений в наблюдательные списки включены объекты, сопровождаемые службой International Laser Ranging Service (ILRS).

СТАТИСТИКА НАБЛЮДЕНИЙ

В 2011–2012 гг. на телевизионном телескопе было проведено 22 ночи наблюдений НКО, на телескопе КТ-50 проведено 37 ночей наблюдений. Все полученные изображения были обработаны до экваториальных координат объектов. Получено 41780 положений 241 КО, из них 5214 положений 10 КО, сопровождаемых службой ILRS, 151 положение пяти миниспутников RapidEye и 54 положения шести наноспутников CubeSat.

Экваториальные координаты были оформлены в виде каталога положений. Общая статистика полученного каталога положений приведена в табл. 1.

С использованием двух телескопов получено достаточное количество наблюдений НКО для оценки случайной погрешности наблюдений. Наличие наблюдений объектов, сопровождаемых службой ILRS, позволило оценить систематическую погрешность наблюдений НКО для обоих телескопов. Наличие наблюдений спутников группировки RapidEye и CubeSat подтверждает возможность наблюдения объектов размером 1 м на телескопе ТВТ и объектов размером 10 см на телескопе КТ-50.

ВЫЧИСЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ОРБИТ И СЛУЧАЙНАЯ ПОГРЕШНОСТЬ НАБЛЮДЕНИЙ

Оценка качества опорной системы звезд. При использовании комбинированного метода наблюдений точность определения экваториальных координат объекта в первую очередь зависит от качества опорной системы – количества звезд и их невязок с каталогом.

При использовании комбинированного метода наблюдений на неподвижном телескопе изображения звезд формируются на дополнительных кадрах. Способ формирования изображения звезд зависит от используемого типа ПЗС-камеры. На телевизионном телескопе, оснащенном телевизионной ПЗС-камерой, используется способ накопления кадров со смещением, время экспозиции составляет 10 с (накопление 250 кадров). На телескопе КТ-50, оснащенном полнокадровой ПЗС-камерой, используется режим накопления с экспозицией 0.4 с. Обработка изображений звезд осуществлялась программой

Таблица 1. Статистика каталога положений низкоорбитальных космических объектов

Телескоп	Список	Количество объектов	Количество проводок*	Длительность проводок*, мин	Количество положений
ТВТ	Все	195	666	3129	40441
	RapidEye	5	9	14.8	151
	ILRS	7	57	363.7	4973
КТ-50	Все	46	218	763	1339
	CubeSat	6	19	21.2	54
	ILRS	10	33	159.1	241

* Под проводкой подразумевается множество положений одного НКО, полученных по наблюдениям одного телескопа на одном витке орбиты НКО

Astrometrica. Параметры обработки: минимальное отношение «сигнал/шум» используемых звезд — четыре, степень полиномов редукции — три, опорный каталог — UCAC 3.

Оценка предельной звездной величины и точности опорной системы для телескопов ТВТ и КТ-50 осуществлена по более чем 600 кадрам со звездами. Среднее количество опорных звезд на кадре для телескопа ТВТ составило 90, для телескопа КТ-50 — 180. При наблюдении НКО на телескопе ТВТ опорными являются звезды до 11^m , СКО опорной системы составляет $3''$. При наблюдении НКО на телескопе КТ-50 опорными являются звезды до 14^m , СКО опорной системы составляет $0.5''$.

Оценка случайной составляющей погрешности положений НКО. Оценка погрешности положений НКО, полученных в НИИ НАО, осуществлялась в два этапа:

- сравнение положений объектов, сопровождаемых службой ILRS, с эфемеридой ILRS, что позволило выявить систематические ошибки измерения времени наблюдений;

- анализ невязок между наблюдаемыми положениями и вычисленной при расчете элементов орбит эфемеридой, что дает представление об уровне случайной погрешности наблюдений.

По данным наблюдений НКО, для которых получено шесть и более положений на дуге более 3° , были вычислены элементы орбит. При вычислении элементов орбит оценивались невязки между наблюдаемыми и вычисленными положениями НКО. Для расчета орбит НКО использовалось специальное программное обеспечение, разработанное в НИИ АО ОНУ [4]. Расчет начальной орбиты осуществлялся по трем положениям с использованием классического метода Лапласа. Уточнение орбиты проводилось методом дифференциальных поправок на осно-

ве аналитической модели движения (задача двух тел) по всем положениям проводки. Для получения более достоверного вычисления из расчетов исключались положения с большими случайными невязкам по критерию 3σ . Дифференциальные уравнения интегрировались классическим методом Эверхарта 19 порядка с переменным шагом [6]. Модель движения учитывает следующие возмущения: гравитационный потенциал Земли до 150 порядка, влияние Луны, Солнца, Юпитера и Венеры (DE/LE 405), приливы в земной коре (модель Вара), световое давление, сопротивление атмосферы. Результатом вычисления является вектор состояния и оскулирующие элементы орбиты на средний момент времени наблюдений, а также следующие невязки $O - C$: da — по прямому восхождению, $d\delta$ — по склонению, dL — вдоль орбиты, dH — поперек орбиты, dR — линейная невязка (определяется с учетом наклонной дальности). На рис. 1, а приведены невязки 218 положений НКО 20720, полученные по наблюдениям на телевизионном телескопе. Невязки положений по прямому восхождению и склонению составили $\pm 1.57''$. На рис. 1, б приведены невязки 27 положений НКО 13003, полученные по наблюдениям на телескопе КТ-50. Невязки положений составили $\pm 0.68''$ по прямому восхождению и $\pm 0.59''$ по склонению.

Из рис. 1 следует, что выраженной систематической составляющей невязок нет, т. е. полученные положения хорошо описываются численной моделью движения НКО. С использованием 31103 положений были определены элементы орбит и оценены невязки НКО. В табл. 2 приведены погрешности положений НКО, вычисленные по наблюдениям на телескопах ТВТ и КТ-50.

Погрешности положений НКО находятся на уровне СКО опорной системы звезд, что свиде-

Таблица 2. Погрешности положений низкоорбитальных космических объектов по всему массиву наблюдений

Телескоп	Количество положений	СКО da	СКО $d\delta$	СКО dL	СКО dH	СКО dR , м
ТВТ	30317	$2.5''$	$2.5''$	$2.6''$	$2.3''$	38.2
КТ-50	786	$0.6''$	$0.6''$	$0.6''$	$0.5''$	8.3

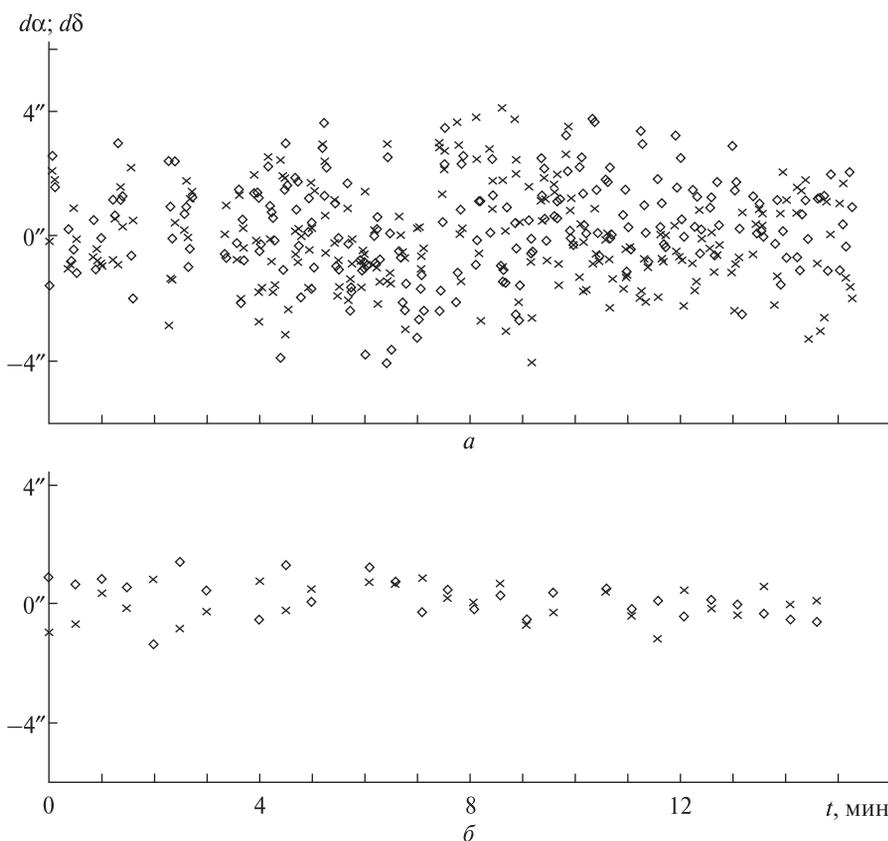


Рис. 1. Невязки расчета орбиты: *a* — по наблюдениям на телескопе ТВТ (объект NORAD 20720, высота орбиты 1503 км), *b* — по наблюдениям на телескопе КТ-50 (объект NORAD 13003, высота орбиты 1719 км). Ромбики — da , крестики — $d\delta$

тельствует о корректном определении координат объектов. Для сравнения: деклорированные точности координатных измерений НКО российских станций оптического слежения находятся в пределах 5–10"; лучшие оптические системы наблюдения геосинхронных КО имеют погрешность наблюдений на уровне $\pm 0.3''$, что на расстоянии 40000 км эквивалентно линейной погрешности ± 82 м.

Оценка систематической составляющей положений НКО. Оценка систематической погрешности наблюдений НКО проводилась сравнением положений, полученных из наблюдений, с эфемеридами ILRS. ILRS предоставляет в открытом доступе высокоточные эфемериды для КА, оснащенных уголковыми отражателями. Эфемериды рассчитываются по регулярным наблюдениям сети лазерных дальномеров (англ. Satellite Laser Ranging). Эфемериды, предоставляемая службой ILRS, представляет собой последовательность декартовых геоцентрических

координат спутника в системе ITRS. В данной работе для сравнения наблюдаемых положений НКО с эфемеридой службы ILRS использовалось специальное программное обеспечение, разработанное совместно с НИИ АО ОНУ. Алгоритм сравнения наблюдаемых положений с эфемеридой ILRS включает в себя: поиск и загрузку эфемерид для данного НКО и даты наблюдения; преобразование трехмерных прямоугольных координат эфемериды из системы ITRS в систему ICRS на эпоху J2000.0; внесение в данные наблюдений поправок за годовую, суточную и планетную абберации; определение прямоугольных координат эфемериды на моменты времени наблюдений с использованием интерполяции Лагранжа по 12 точкам; преобразование прямоугольных координат эфемериды к угловым топоцентрическим и определение разностей $O - C$ между наблюдаемыми и вычисленными угловыми топоцентрическими координатами КО. Разности $O - C$ определялись в тех же величинах,

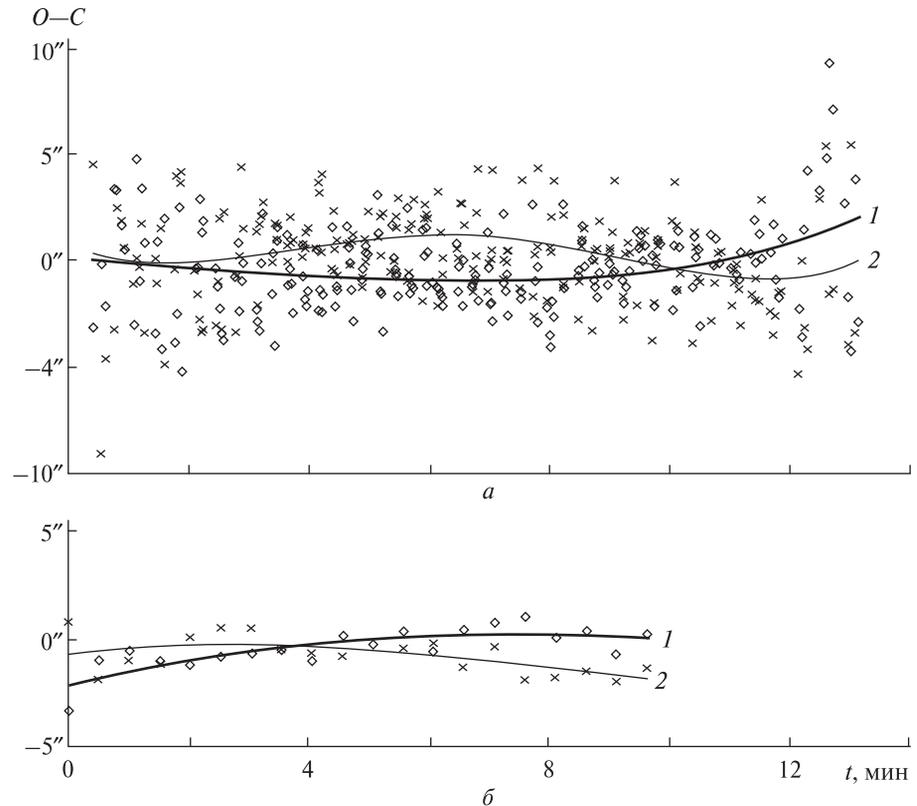


Рис. 2. Значения $O - C$ положений с аппроксимирующей кривой: a — полученные по наблюдениям спутника Jason (высота 1320 км) на телескопе ТВТ, b — по наблюдениям на телескопе КТ-50. Ромбики — $d\alpha$, крестики — $d\delta$, линия 1 — $d\alpha_{ан}$, линия 2 — $d\delta_{ан}$

что и невязки расчета орбиты: $d\alpha$, $d\delta$, dL , dH , dR . Дополнительно определялось значение $O - C$ по времени dLt , рассчитываемое через значение $O - C$ вдоль орбиты dL с использованием видимой угловой скорости НКО.

Для вычисления систематических погрешностей наблюдений на телевизионном телескопе использовались 4973 положения семи НКО, на телескопе КТ-50 — 241 положение десяти НКО. В течение наблюдений НКО на одном витке орбиты условия наблюдений изменяются плавно, поэтому среднее значение $O - C$ положений НКО может быть аппроксимировано полиномом. Значения аппроксимирующего полинома $O - C$ обозначаются как $d\alpha_{ан}$, $d\delta_{ан}$, $dL_{ан}$, $dH_{ан}$. На рис. 2 приведены значения $O - C$ проводок НКО с аппроксимирующей кривой для телескопов ТВТ и КТ-50.

Для телескопа ТВТ средние значения $O - C$ составили $-0.36''$ по прямому восхождению и $+0.11''$ по склонению, СКО аппроксимирующей

кривой $O - C$ составило $\pm 0.79''$ по прямому восхождению и $\pm 0.75''$ по склонению. Для телескопа КТ-50 значения $O - C$ составили $-0.43''$ по прямому восхождению и $-0.78''$ по склонению, СКО аппроксимирующей кривой $O - C$ составило $\pm 0.85''$ по прямому восхождению и $\pm 0.93''$ по склонению.

СКО аппроксимирующих кривых $O - C$ по всему каталогу приведены в табл. 3.

Определение поправки моментов времени наблюдений. Из-за большой видимой скорости НКО на точность получаемых положений сильно влияют погрешности определения моментов времени ПЗС-кадров. Например, при наблюдении НКО с видимой скоростью 0.2 град/с погрешность времени в 0.001 с приводит к угловой ошибке $0.72''$ вдоль орбиты. Различные задержки в электронном оборудовании вносят постоянную ошибку в моменты времени получаемых кадров, что требует учета поправки времени dt .

Таблица 3. СКО аппроксимирующих кривых $O - C$ по всему каталогу

Телескоп	Количество $O - C$	$d\alpha$	$d\delta$	$dL_{ан}$	$dH_{ан}$
ТВТ	4973	1.5"	1.5"	1.4"	1.6"
КТ-50	241	1.0"	1.3"	1.2"	1.1"

Таблица 4. Расчет поправки времени dt для телескопов ТВТ и КТ-50

dt	$d\alpha_{ан}$	$d\delta_{ан}$	$dL_{ан}$	$dH_{ан}$	Среднее dLt
Телескоп ТВТ					
0.0000	2.31	2.05	2.68	1.65	-0.0031
-0.0031	1.56	1.46	1.44	1.58	-0.0005
-0.0036	1.48	1.45	1.37	1.58	-0.0001
Телескоп КТ-50					
0.0000	1.36	1.77	1.95	1.21	0.0025
0.0025	0.99	1.34	1.17	1.11	-0.0001

Поправка dt времени наблюдений принималась как среднее значение $O - C$ сравнения с эфемеридой IIRS по времени dLt . Для проверки корректности внесенной поправки по времени осуществлялся повторный расчет $O - C$ и оценивалось изменение СКО аппроксимирующих кривых $O - C$ по прямому восхождению и склонению. Если новое среднее значение $O - C$ по времени dLt превосходило ± 0.0001 с, это значение прибавлялось к поправке dt времени наблюдений.

Поправка времени dt рассчитывалась по всем значениям $O - C$: для телескопа ТВТ по 4973 положениям, для телескопа КТ-50 по 241 положению. Значения рассчитанных поправок времени dt для телескопов ТВТ и КТ-50 приведены в табл. 4. Видно, что внесение поправки времени dt приводит к существенному уменьшению СКО аппроксимирующих кривых $O - C$ по склонению и прямому восхождению.

ВЫВОДЫ

1. За 2011–2012 гг. в НИИ НАО получено 41840 положений 241 НКО (на телевизионном телескопе 40441 положений 195 НКО; на телескопе КТ-50 1399 положений 46 НКО). Эффективность примененного метода наблюдений подтверждается наличием наблюдений микроспутников

класса RapidEye на телевизионном телескопе и наноспутников CubeSat на телескопе КТ-50.

2. Случайная погрешность положений, полученных на телевизионном телескопе, составила $\pm 2.5''$, на телескопе КТ-50 — $\pm 0.6''$. Определена средняя систематическая погрешность положений, которая составила $\pm 1.5''$ для наблюдений на телевизионном телескопе и $1.2''$ на телескопе КТ-50.

1. Базей А. А., Кара И. В. Применение методов Эверхарта 15, 17, 19, 21 порядков для вычисления траектории движения небесных тел в околопланетном пространстве // Вісник Астрон. школи. — 2009. — 6, № 2. — С. 155–157.
2. Ковальчук А. Н., Пинигин Г. И., Шульга А. В. Скоростной автоматический комплекс для регистрации небесных объектов естественного и искусственного происхождения в околоземном космическом пространстве // Околоземная астрономия и проблемы изучения малых тел Солнечной системы. — М.: ИНАСАН, 2000. — С. 361–371.
3. Козырев Е. С., Сибирякова Е. С., Шульга А. В. Исследование точности астрометрической редукции при использовании комбинированного метода наблюдений небесных объектов // Космічна наука і технологія. — 2010. — 16, № 5. — С. 71–76.
4. Козырев Е. С., Сибирякова Е. С., Шульга А. В. Координатные наблюдения низкоорбитальных объектов

- околоземного космического пространства с использованием режима синхронного накопления телевизионных кадров // *Космічна наука і технологія*. — 2011. — 17, № 3. — С. 83—87.
5. Шульга А. В., Козырев Е. С., Сибирякова Е. С. и др. Мобильный комплекс телескопов НИИ НАО для наблюдений объектов околоземного космического пространства // *Космічна наука і технологія*. — 2012. — 18, № 4. — С. 52—58.
 6. Kara V. Monitoring the accuracy of observations of passive objects on the basis of the International Laser Ranging Service (ILRS) data // *Odessa Astron. Pubs.* — 2010. — 22. — P. 20—24.
 7. Shulga O., Kozryev Y., Sybiryakova Y. Observation of the fast NEO objects with prolonged exposure // *roc. of IAU Symposium N 248 «A Giant Step: From Milli- to Micro-arcsecond Astrometry»*. — Shanghai, 2007. — P. 128—129.
 8. Shulga O., Kozryev Y., Sybiryakova Y. Observation of NEO having high apparent rates with Mobitel telescope // *Proc. of Gaia follow-up network for solar system objects workshop held at IMCCE — Paris observatory, France* — 2011. — P. 97—100.

Стаття надійшла до редакції 21.10.13

*В. С. Вовк, Є. С. Козырев, М. О. Куліченко,
Є. С. Сибирякова, О. В. Шульга*

ПЕРШІ РЕЗУЛЬТАТИ РЕГУЛЯРНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ НИЗЬКООРБІТАЛЬНИХ КОСМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ В НДІ «МИКОЛАЇВСЬКА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ»

Наводяться результати спостережень низькоорбітальних космічних об'єктів комбінованим ПЗЗ-методом, характеристики точності опорної системи та результати порівняння отриманих положень космічних об'єктів з ефемеридою International Laser Ranging Service.

*V. S. Vovk, Y. S. Kozryev, N. A. Kulichenko,
Y. S. Sybiryakova, O. V. Shulga*

FIRST RESULTS OF REGULAR OBSERVATIONS OF LOW EARTH SPACE OBJECTS IN THE RI “NIKOLAEV ASTRONOMICAL OBSERVATORY”

We present some results of observations of low Earth satellites with the use of combined CCD-method, our value for the reference system accuracy and some results of comparisons of satellite positions with ephemerides of International Laser Ranging Service.