

УДК 004.05:004.932

**В. Е. Саваневич¹, А. Б. Брюховецкий¹, Ю. Н. Иващенко²,
И. Б. Вавилова², М. М. Безкровный³, Е. Н. Диков⁴,
В. П. Власенко¹, Н. С. Соковицова¹, Я. С. Мовсесян¹,
Н. Ю. Дихтяр¹, Л. В. Еленин⁵, А. В. Погорелов¹, С. В. Хламов¹**

¹Ужгородский национальный университет
ул. Заньковецкой 89А, г. Ужгород, 88015
vadyu@savanevych.com

²Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03680
irivav@mao.kiev.ua

³Запорожский институт экономики и информационных технологий
ул. Кияшка, 16-Б, Запорожье, 69015
bezkvovnii@gmail.com

⁴Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический
институт микрографии, пер. Пархоменко, 1/50, Харьков, 61046
endikov@gmail.com

⁵Институт прикладной математики имени М. В. Келдыша РАН
Миусская пл. 4, Москва, 125047, Россия
l.elelin@gmail.com

Сравнительный анализ показателей точности позиционных ПЗС-измерений малых тел Солнечной системы программными обеспечениями CoLiTec и «Astrometrica»

В рамках Украинской виртуальной обсерватории создано программное обеспечение CoLiTec для автоматического поиска малых тел Солнечной системы на серии ПЗС-кадров. С его использованием было предварительно открыто четыре кометы, более полутора тысяч астероидов и отправлено в Minor Planet Center около семисот тысяч позиционных ПЗС-измерений. В работе проанализированы показатели точности позиционных ПЗС-измерений программного обеспечения CoLiTec по данным Minor Planet Center, а также проведен сравнительный анализ данных показателей по результатам обработки одних и тех же кадров программным обеспечением CoLiTec и «Astrometrica». При малых отношениях сигнал-шум позиционные ПЗС-измерения программного обеспечения «Astrometrica» имеют среднее квадратичное отклонение на 30—50 % больше, чем у программного обеспечения CoLiTec.

© В. Е. САВАНЕВИЧ, А. Б. БРЮХОВЕЦКИЙ, Ю. Н. ИВАЩЕНКО, И. Б. ВАВИЛОВА,
М. М. БЕЗКРОВНЫЙ, Е. Н. ДИКОВ, В. П. ВЛАСЕНКО, Н. С. СОКОВИЦОВА,
Я. С. МОВСЕСЯН, Н. Ю. ДИХТЯР, Л. В. ЕЛЕНИН, А. В. ПОГОРЕЛОВ, С. В. ХЛАМОВ, 2015

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ ТОЧНОСТІ ПОЗИЦІЙНИХ ПЗЗ-ВИМІРЮВАНЬ МАЛИХ ТІЛ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ ЗА ДОПОМОГОЮ ПРОГРАМНИХ ЗАБЕЗПЕЧЕНЬ COLITEC І «ASTROMETRICA», Саваневич В. Є., Брюховецький О. Б., Іващенко Ю. М., Вавилова І. Б., Безкровний М. М., Діков Є. М., Власенко В. П., Соковікова Н. С., Мовсесян Я. С., Діхтяр М. Ю., Єленін Л. В., Погорелов А. В., Хламов С. В. — В рамках Української віртуальної обсерваторії створено програмне забезпечення CoLiTec автоматичного пошуку малих тіл Сонячної системи на серії ПЗЗ-кадрів. З його використанням було попередньо відкрито чотири комети, понад півтори тисячі астероїдів і відправлено в Minor Planet Center близько семисот тисяч позиційних ПЗС-вимірювань. У роботі проаналізовано показники точності позиційних ПЗС-вимірювань програмного забезпечення CoLiTec за даними Minor Planet Center, а також проведено порівняльний аналіз даних за результатами обробки одних і тих же кадрів програмним забезпеченням CoLiTec і «Astrometrica». При малих відношеннях сигнал-шум позиційні ПЗС-вимірювання з програмним забезпеченням «Astrometrica» мають середнє квадратичне відхилення на 30—50 % більше, ніж при використанні програмного забезпечення CoLiTec.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE POSITIONAL ACCURACY OF CCD MEASUREMENTS OF SMALL SOLAR SYSTEM BODIES BY THE COLITEC AND «ASTROMETRICA» SOFTWARES, by Savanevych V. E., Briukhovetskyi O. B., Ivashchenko Yu. M., Vavilova I. B., Bezkrivnyy M. M., Dikov E. M., Vlasenko V. P., Sokovikova N. S., Movsesian Ya. S., Dikhtyar M. Yu., Elenin L. V., Pogorelov A. V., Khlamov S. V. — Within the framework of Ukrainian Virtual Observatory the CoLiTec software for the automated search of small celestial objects of the Solar System on a series of CCD frames was developed. With its use four comets, more than a thousand asteroids have been previously discovered and about seven hundred thousand CCD-positional measurements have been sent to the Minor Planet Center. This paper analyzes the positional accuracy of CCD measurements with the CoLiTec software according to Minor Planet Center data, as well as we provide a comparative analysis of the results of the processing of the same CCD frames by the CoLiTec and «Astrometrica» softwares. We conclude that «Astrometrica» software have a standard deviation of 30—50 % more than the CoLiTec software at the low signal-to-noise ratio of the position CCD-measurements.

ВВЕДЕНИЕ

Астрометрические исследования объектов Солнечной системы (ССО) и других небесных объектов продолжают оставаться актуальными, в том числе рост интереса к изучению астероидов связан с проблемами астероидно-кометной опасности [15]. Данная проблема [17, 19] в XXI

веке стала приоритетной темой научных конференций по ССО, регулярно рассматривается ООН, космическими агентствами ведущих стран мира и влиятельными неправительственными научными организациями.

Постановки задач таких астрометрических исследований развиваются, видоизменяются, их решение часто необходимо получать за ограниченное время, а требования к точности позиционных ПЗС-измерений ССО довольно высокие. Это приводит к необходимости создания собственного научного программного обеспечения (ПО) автоматической астрометрии ПЗС-кадров для проведения таких исследований.

В этой связи в рамках Украинской виртуальной обсерватории [3, 21—23] создано программное обеспечение CoLiTec (Collection Light Technology) для автоматического поиска астероидов и комет на серии ПЗС-кадров [8, 9, 20]. Подробное описание базового метода, процедуры обнаружения ССО и задач, возникающих при обработке кадров, приведено в нашей работе [20]. Без исследования статистических характеристик позиционных ПЗС-измерений ССО невозможно повышение точности позиционных ПЗС-измерений обсерваторий и модернизации используемого ими ПО.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ «ASTROMETRICA» И COLITEC

Программное обеспечение «Astrometrica» (<http://www.astrometrica.at/>) [14, 18] достаточно известно среди профессионалов и любителей астрометрии, занимающихся позиционными ПЗС-измерениями объектов Солнечной системы [13, 16]. Основным недостатком ПО «Astrometrica» — очень слабые поисковые возможности в автоматическом режиме.

Программное обеспечение CoLiTec (<http://www.neoastrosoft.com/>) лишено данного недостатка. Сильной стороной внутрикадровой обработки ПО CoLiTec [2, 5—7, 9, 11, 12, 20] является яркостное выравнивание кадров любого размера, оценка положения небесных объектов на ПЗС-кадрах с высокой точностью, возможность исключения из обработки позиционных ПЗС-измерений объектов с нулевым видимым движением, обнаружение астероидов на основе накопления статистики изображений объектов вдоль траекторий с неизвестными параметрами движения [4], автоматическое исключение аномальных позиционных ПЗС-измерений.

Программные обеспечения CoLiTec и «Astrometrica» реализуют такие возможности: быстрый выбор профиля конфигурации, калибровка ПЗС-кадров, инструменты настройки и трансформации ПЗС-изображения, поддержка локальных (XPM, USNO A2.0, USNO B1.0, UCAC3, UCAC4) и интернет (USNO B1.0, UCAC4) каталогов звезд, запись координатной информации в формате WCS в заголовках FITS-

кадра, интерактивный режим позиционного ПЗС-измерения объектов, инструмент «лупа», автоматизированный поиск движущихся объектов, возможность визуальной инспекции автоматически обнаруженных движущихся объектов, выдача астрометрических ПЗС-измерений в формате Minor Planet Center (Центр малых планет, MPC), отправка измерений в MPC из интерфейса ПО, отображение известных и обнаруженных объектов на кадре, техника сложения кадров Track&Stack.

Программное обеспечение CoLiTec, в отличие от ПО «Astrometrisa», реализует такие возможности: астрометрическая редукция ПЗС-кадров с большими полями зрения (от 2 до 10[°]), поддержка локального каталога Tycho2, поддержка онлайн-каталогов (NOMAD, SDSS v8), возможность отдельного применения опорных каталогов для астрометрической и фотометрической редукций, автоматизированный поиск движущихся слабых (тусклых) объектов (отношение сигнал-шум $OSR \sim 2.5$), идентификация объектов с нулевым видимым движением с базами данных переменных звезд (VSX) и галактик (HyperLeda), версия OnLine Data Analysis System (OLDAS) ПО CoLiTec обеспечивает оперативную обработку данных и назначение подтверждения интересных обнаруженных объектов в ночь их открытия, многопоточную поддержку многопроцессорных систем, контроль результатов позиционных ПЗС-измерений не позднее, чем через 30 мин после окончания наблюдений, сохранение результатов обработки кадров (обнаруженные объекты и пр.), визуализация результатов обработки LookSky [10] работает отдельно от основной программы, не препятствуя продолжению обработки данных, идентификация обнаруженных движущихся объектов с онлайн базой Minor Planet Center Orbit (MPCORB).

Программное обеспечение CoLiTec не реализует такие возможности: поддержка локальных каталогов (PPMXL и СМС-14), поддержка онлайн-каталогов (XPM, UCAC3, СМС-14, PPMXL), идентификация обнаруженных движущихся объектов с локальной базой MPCORB.

Программное обеспечение CoLiTec широко используется в ряде обсерваторий СНГ. С помощью CoLiTec впервые в СНГ и Балтии были открыты астероид и комета в автоматизированном режиме. Всего с использованием CoLiTec было открыто четыре кометы (C/2011 X1 (Elenin) <http://www.minorplanetcenter.org/mpec/K10/K10XA1.html>), P/2011 NO1(Elenin) (<http://www.minorplanetcenter.net/mpec/K11/K11O10.html>), C/2012 S1 (<http://www.minorplanetcenter.org/mpec/K12/K12S63.html>), P/2013 V3 (Nevski) <http://www.minorplanetcenter.net/mpec/K13/K13V45.html>) из семи, открытых в СНГ и Балтии более чем за 20 последних лет. Так, 10 декабря 2010 г. с использованием программы CoLiTec была открыта комета C/2010 X1 (Elenin), которая стала первой кометой, открытой астрономом СНГ. Всего при помощи программы CoLiTec открыто более 1560 астероидов (на рис. 1 изображены фрагменты кадров, на которых были открыты некоторые из них). Среди открытых астероидов — четыре из 16 открытых за всю

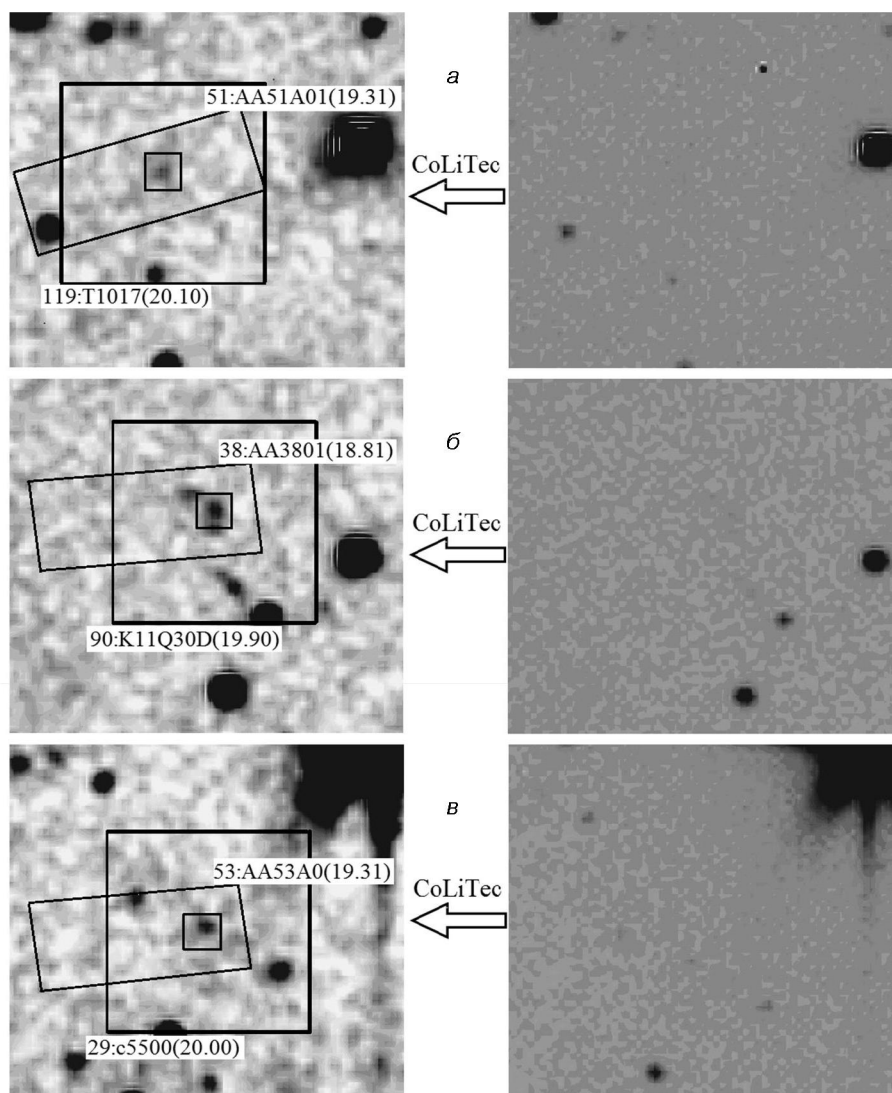


Рис. 1. Примеры ПЗС-изображений астероидов, открытых с помощью ПО CoLiTec

историю астрономии СССР, СНГ и Балтии объекта, сближающиеся с Землей (NEO), 21 троянский астероид Юпитера, один кентавр из двух, открытых в СНГ и Балтии, трем астероидам были посвящены отдельные электронные циркуляры MPC (<http://www.minorplanetcenter.net/mpec/K11/K11J02.html>, <http://www.minorplanetcenter.net/mpec/K11/K11Q39.html>, <http://www.minorplanetcenter.net/mpec/K11/K11Q39.html>). С использованием CoLiTec в 2012 (2011) году сделано 80 (86) % позиционных ПЗС-измерений и 74 (75) % открытий астероидов.

Значительные успехи ПО CoLiTec связаны с обнаружением объектов с околонулевым видимым движением. Так, комета С 2012 S1 (ISON) в момент открытия имела размер изображения 5 пкл и за четы-

ре кадра переместилась на 3 пкл. Кентавр 2013 UL10 в момент открытия при размере изображения 4-5 пкл переместился на 10 пкл.

В 2014 г. программное обеспечение CoLiTec было рекомендовано для членов сети Gaia-FUN-SSO (<https://gaiafunssso.imcce.fr/>) в качестве программного инструмента для выявления слабых движущихся объектов на ПЗС-кадрах.

Три обсерватории-пользователя CoLiTec неоднократно входили в ТОП-30 самых продуктивных обсерваторий мира по количеству позиционных ПЗС-измерений астероидов. Обсерватория International Scientific Optical Network New Mexico (ISON NM) по суммарным итогам 2011 и 2012 гг. заняла седьмое место в мире как по количеству ПЗС-измерений, так и по числу открытий. Данные достижения обеспечили возможность анализа показателей точности ПО CoLiTec, представленных MPC (http://www.neoastrosoft.com/mpc_statistic_ru/).

В табл. 1 общее количество измерений и объектов (графа 3), а также количество открытий астероидов (графа 4) представлены согласно циркулярам MPC 2012 г. Для каждой обсерватории в табл. 1 указаны ее рейтинг и код (графы 1, 2) диаметр D главного зеркала телескопа в метрах (графа 5), масштаб S в секундах дуги на пиксель (графа 6), среднее отклонение по прямому восхождению и склонению в секундах дуги ($\bar{\alpha}$ и $\bar{\delta}$ соответственно), а также средние квадратичные отклонения σ_{α} и σ_{δ} отклонений прямого восхождения и склонения в секундах дуги (графа 7), значения которых приведены согласно MPC (<http://www.minorplanetcenter.net/iau/special/residuals2.txt>). Для расчета значений средних квадратичных отклонений позиционных ПЗС-измерений в секундах дуги и в пикселях (обозначены как σ_{α} и σ_{δ}^{pix} соответственно — графы 8, 9) и среднего модуля отклонений (СМО) ПЗС-измерений положения объекта (графа 10) использовались выражения

$$\sigma_{\alpha} = 0.5 \left(\frac{D}{S} \right), \quad (1)$$

$$\sigma_{\delta}^{pix} = \sigma_{\delta} / S, \quad (2)$$

$$СМО = \sqrt{(\sigma_{\alpha})^2 + (\sigma_{\delta})^2}. \quad (3)$$

Средние ошибки позиционных ПЗС-измерений ПО CoLiTec — одни из наименьших среди ТОП-30 обсерваторий. В свою очередь, СКО позиционных ПЗС-измерений ПО CoLiTec, выраженное в секундах дуги, не является наименьшим. Однако это связано с используемым масштабом пикселя, и данный показатель в большей степени характеризует систему «телескоп — ПЗС-камера — ПО». Собственно ПО характеризует СКО ПЗС-измерений, выраженное в пикселях. По данному показателю обсерватории-пользователи CoLiTec также являются одними из лучших в указанном списке ТОП-30 обсерваторий мира и лучшими среди обсерваторий, использующих телескопы с малой апертурой (рис. 2).

Наряду с анализом данных MPC проводился сравнительный анализ точности ПО CoLiTec и «Astrometrica» по результатам обработки

Таблица 1. Наиболее продуктивные обсерватории мира по ПЗС-измерениям астероидов за 2012 г.

Рейтинг и код обсерватории	Количество измерений (объектов)	Количество открытий	D , м	S , сд/пкл	\pm , сд \pm , сд	, сд	μ , пкл	CMO , сд
1 G96	2080033 (384204)	2080033	1.5	1	0.02±0.33 0.02±0.28	0.305	0.305	0.028
2 F51	1948353 (467091)	1948353	1.8	0.3	0.07±0.15 0.04±0.17	0.16	0.53	0.081
3 703	1723293 (282864)	1723293	0.68	2.6	-0.22±0.65 0.07±0.62	0.635	0.24	0.231
4 704	1681504 (262209)	1681504	1	2.2	0.26±0.67 0.43±0.64	0.655	0.29	0.502
5 691	896972 (163714)	896972	0.9	1	-0.16±0.32 0.10±0.29	0.305	0.27	0.189
6 E12	259295 (62621)	259295	0.5	1.8	-0.01±0.51 0.29±0.50	0.505	0.28	0.29
7 J43	102641 (22682)	102641	0.5	1.2	0.19±0.48 0.05±0.40	0.44	0.36	0.196
8 926	100161 (29986)	100161	0.81	0.87	0.02±0.37 0.05±0.35	0.36	0.41	0.54
9 H15 (CoLiTec)	97878 (24170)	97878	0.45	2	-0.06±0.50 -0.01±0.53	0.515	0.25	0.061
10 106	72192 (17451)	72192	0.6	2	0.04±0.36 -0.12±0.34	0.35	0.17	0.126
11 A14	57243 (16239)	57243	0.5		0.06±0.37 -0.02±0.32	0.345		0.063
12 J04	43209 (10708)	43209	1	0.62	0.21±0.28 0.20±0.27	0.275	0.44	0.29
13 D00 (CoLiTec)	31494 (7403)	31494	0.4	2.06	0.00±0.57 -0.06±0.41	0.49	0.23	0.06
14 291	24272 (6224)	24272	1.8	0.6	0.07±0.33 0.13±0.28	0.305	0.5	0.148
15 461	23847 (5615)	23847	0.6	1.1	0.00±0.27 0.15±0.27	0.27	0.24	0.15
16 644	22714 (4486)	22714	1.2	1				
17 H21	22672 (3870)	22672	0.61	0.8	0.03±0.34 0.01±0.36	0.35	0.43	0.032
18 I41	21245 (2392)	21245	1.2	1.01	0.11±0.23 -0.03±0.23	0.23	0.22	0.114
19 A24	18940 (2412)	18940	0.36	1.4	0.14±0.37 0.24±0.33	0.35	0.25	0.278
20 645	18369 (5650)	18369	2.5	0.396				
21 807	12702 (2383)	12702	0.41		0.04±0.29 -0.01±0.24	0.265		0.041
22 A50 (CoLiTec)	11559 (3725)	11559	0.6	2.07	0.25±0.50 -0.04±0.46	0.48	0.23	0.253
23 716	10669 (491)	10669	0.35	2.5	0.06±0.33 -0.01±0.23	0.28	0.1	0.061
24 D29	9918 (2927)	9918	1.04	1.705	0.09±0.43 -0.01±0.44	0.435	0.25	0.091
25 C41	8904 (3188)	8904	0.4	1.8	-0.16±0.85 0.09±0.72	0.785	0.43	0.184
26 621	6782 (1692)	6782	0.6	1.2	0.10±0.35 -0.01±0.35	0.35	0.29	0.101

Рейтинг и код обсерватории	Количество измерений (объектов)	Количество открытий	D , м	S , сд/пкл	\pm , сд \pm , сд	, сд	σ_{pix}^* пкл	CMO , сд
27 H45	6414 (368)	6414	0.51		0.04 ± 0.33 -0.05 ± 0.31	0.32		0.064
28 D03	5489 (1396)	5489	0.4	1.2	-0.06 ± 0.64 -0.05 ± 0.45	0.545	0.45	0.078
29 950	5477 (800)	5477	2.5		0.09 ± 0.28 0.11 ± 0.24	0.26		0.142
30 71	5427 (329)	5427	0.5		0.01 ± 0.63 0.12 ± 0.43	0.53		0.12

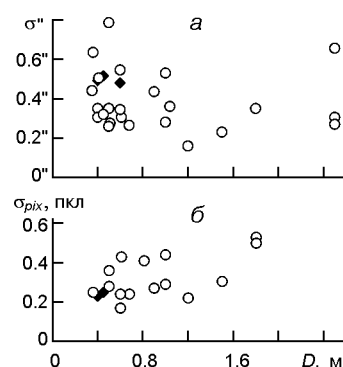


Рис. 2. Ошибки ведущих астероидных обзоров по данным 2012 г.: *a* — СКО позиционных ПЗС-измерений в секундах дуги, *б* — СКО позиционных ПЗС-измерений в пикселях. Темные ромбики — данные обсерваторий-пользователей CoLiTec, кружки — данные других обсерваторий

одних и тех же кадров [1]. При использовании обоих ПО использовалась кубическая модель координатной редукции, а каталог UCAC-4 [24] использовался в качестве опорного. Кадры были получены в обсерватории ISON-NM (код MPC H15) в период с 04 по 30 марта 2014 г. Обсерватория находится на горе Джой (Мейхилл), Нью-Мексико, США и использует 40-см телескоп САНТЕЛ-400АН и ПЗС-матрицу FLI ML09000-65 (3056 × 3056 пкл, размер пикселя 12 мкм). Время экспозиции составляло 150 с. Всего было использовано 19 серий по четыре кадра каждая. В предварительном анализе было использовано 36 серий. Однако кадры остальных серий не получили надежного отождествления с использованием ПО «Astrometrica», т. е. на каждой серии из четырех кадров был хотя бы один кадр, не отождествленный с используемым звездным каталогом. Некоторые кадры были отброшены из-за того, что все опорные звезды «Astrometrica» находились в одной половине кадра (на рис. 3, *a* опорные звезды отмечены кружками), при равномерном распределении опорных звезд на кадре при использовании CoLiTec (рис. 3, *б*). Также были исключены кадры с существенными сбоями в суточном ведении и полученные при сильном ветре.

Сравнительный анализ точности оценки положения опорных звезд показал практически полное совпадение их показателей точности для ПО CoLiTec и «Astrometrica» при условии, что кадры были на-

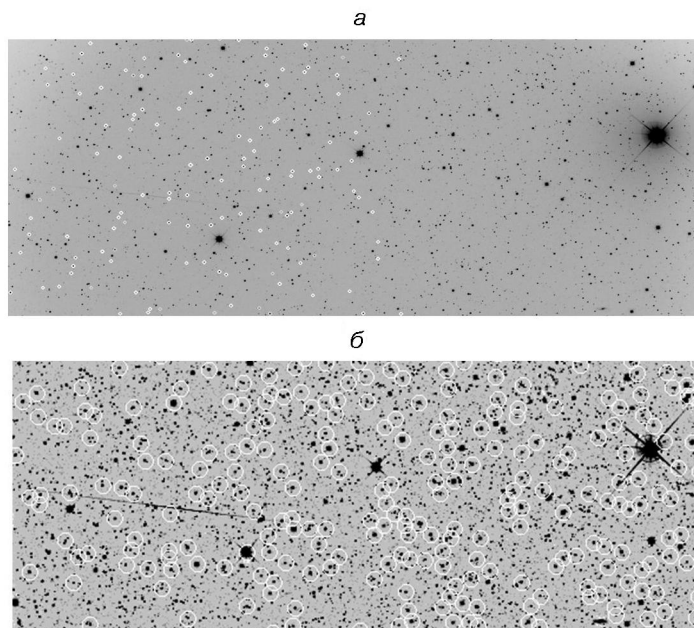
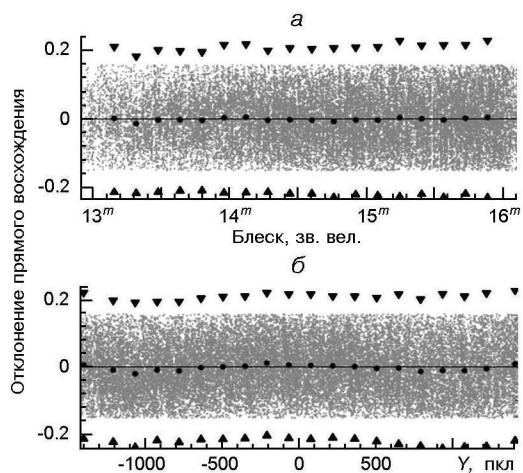


Рис. 3. Отображение опорных звезд на ПЗС-кадре, обработанном: *а* — с помощью ПО «Astrometrica», *б* — с помощью ПО CoLiTec

Рис. 4. Зависимость отклонений прямого восхождения: *а* — от каталожной оценки блеска опорных звезд, *б* — от положения опорных звезд на кадре (серые точки — единичные ПЗС-измерения, черные точки — средние значения отклонений, треугольники — уровень отклонений 3σ)



дежно отождествлены в ПО «Astrometrica». Всего было проанализировано 30391 позиционное ПЗС-измерение опорных звезд на указанных выше 19 сериях по четыре кадра. При использовании ПО CoLiTec и «Astrometrica» СКО составляло 0.08 сд по прямому восхождению и 0.07 сд по склонению независимо от используемого ПО.

Анализ зависимости отклонений позиционных ПЗС-измерений опорных звезд по прямому восхождению от их блеска и координат на кадре свидетельствуют об отсутствии влияния этих параметров на точность ПЗС-измерений опорных звезд (рис. 4, табл. 2). На графиках, представленных на рис. 4, 7, серыми точками отмечены единичные ПЗС-измерения, круглым маркерам соответствуют средние значения

Таблица 2. Распределение отклонений позиционных ПЗС-измерений опорных звезд по диапазонам видимого блеска

Диапазон блеска	Количество ПЗС-измерений	СКО отклонений по прямому восхождению, сд	СКО отклонений по склонению, сд
11.5...12.0 ^m	11	0.10	0.05
12.0...13.0 ^m	823	0.08	0.07
13.0...14.0 ^m	5989	0.08	0.07
14.0...15.0 ^m	10347	0.08	0.07
15.0...15.5 ^m	5361	0.08	0.07
15.5...16.0 ^m	6245	0.08	0.08
16.0...16.5 ^m	1604	0.09	0.08
16.5...17.0 ^m	11	0.10	0.07
Всего	30391	0.08	0.07

Таблица 3. Распределение позиционных ПЗС-измерений астероидов по диапазонам ОСШ

ОСШ		ПЗС-измерения ПО CoLiTec и «Astrometrica»		ПЗС-измерения только ПО CoLiTec	
min	max	количество	доля, %	количество	доля, %
0	1.8	0	0.00	36	14.23
1.8	3.5	154	7.49	94	37.15
3.5	6.8	822	39.96	72	28.46
6.8	10.1	396	19.25	24	9.49
10.1	13.4	213	10.35	9	3.56
13.4	16.7	130	6.32	0	0.00
16.7	20.0	71	3.45	4	1.58
20.0	23.3	64	3.11	2	0.79
23.3	26.6	53	2.58	2	0.79
26.6	29.9	35	1.70	1	0.40
29.9	33.2	27	1.31	3	1.19
33.2	36.5	11	0.53	5	1.98
36.5	274.8	81	3.94	1	0.40
Всего:		2057	100 %	253	100 %

Таблица 4. Основные параметры отклонений позиционных ПЗС-измерений нумерованных астероидов. При построении использовался HORIZONS (ПО «Astrometrica» и CoLiTec)

Количество обработанных ПЗС-измерений	Доля отбракованных измерений	Среднее отклонений по прямому восхождению, сд	Среднее отклонений по склонению, сд	СКО отклонений по прямому восхождению, сд	СКО отклонений по склонению, сд
ПО «Astrometrica»					
2002	0 %	0.11	0.04	0.77	0.67
1902	5 %	0.10	0.03	0.40	0.31
1802	10 %	0.09	0.02	0.35	0.27
ПО CoLiTec					
2002	0 %	0.11	0.03	0.50	0.39
1902	5 %	0.10	0.03	0.39	0.32
1802	10 %	0.09	0.03	0.34	0.29

Таблица 5. Распределение отклонений позиционных ПЗС-измерений нумерованных астероидов по диапазонам ОСШ

ОСШ		Кол-во ПЗС-измерений	«Astrometrica»		CoLiTec	
min	max		СКО отклонений по прямому восхождению, сд	СКО отклонений по склонению, сд	СКО отклонений по прямому восхождению, сд	СКО отклонений по склонению, сд
1.8	3.5	119	0.97	1.02	0.78	0.68
3.5	6.8	804	1.10	0.95	0.62	0.49
6.8	10.1	397	0.39	0.27	0.46	0.32
10.1	13.4	215	0.26	0.18	0.26	0.20
13.4	16.7	130	0.23	0.16	0.21	0.18
16.7	20.0	69	0.28	0.16	0.24	0.16
20.0	23.3	65	0.16	0.13	0.15	0.13
23.3	26.6	49	0.16	0.10	0.15	0.11
26.6	29.9	36	0.14	0.09	0.26	0.14
29.9	33.2	26	0.12	0.08	0.11	0.10
33.2	36.5	13	0.10	0.06	0.10	0.09
36.5	274.8	79	0.22	0.17	0.22	0.11
Всего		2002	0.77	0.67	0.50	0.39

Рис. 5. Зависимость отклонений экваториальных координат (*a* — прямого восхождения, *б* — склонения) от диапазонов ОСШ (1 — ПО «Astrometrica», 2 — CoLiTec)

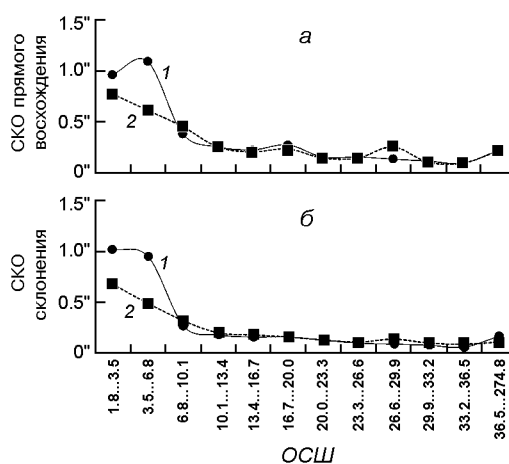
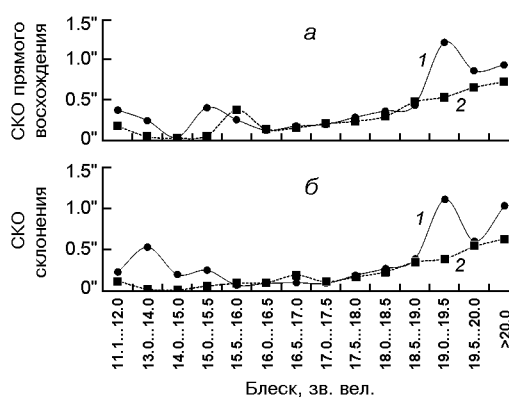


Рис. 6. Зависимость отклонений экваториальных координат (*a* — прямого восхождения, *б* — склонения) от диапазонов видимого блеска (1 — ПО «Astrometrica», 2 — CoLiTec)



отклонений на участке анализа, треугольные маркеры ограничивают доверительный интервал, соответствующий 3 (СКО).

В анализе использовались только положения астероидов, позиционные ПЗС-измерения которых попали в архив MPCAT-OBS (<http://www.minorplanetcenter.net/iau/ECS/MPCAT-OBS/MPCAT-OBS.html>).

Таблица 6. Отклонения экваториальных координат нумерованных астероидов для диапазонов видимого блеска

Блеск		Кол-во ПЗС-измере- ний	ПО «Astrometrica»		ПО CoLiTec	
max	min		СКО отклонений по прямому восхождению, сд	СКО отклонений по склоне- нию, сд	СКО отклонений по прямому восхождению, сд	СКО отклонений по склоне- нию, сд
11.1 ^m	12.0 ^m	12	0.38	0.23	0.18	0.12
13.0	14.0	4	0.25	0.53	0.05	0.02
14.0	15.0	4	0.04	0.20	0.03	0.01
15.0	15.5	12	0.41	0.25	0.06	0.06
15.5	16.0	22	0.26	0.07	0.38	0.09
16.0	16.5	25	0.13	0.09	0.14	0.10
16.5	17.0	40	0.18	0.10	0.16	0.19
17.0	17.5	105	0.20	0.09	0.21	0.11
17.5	18.0	204	0.29	0.19	0.24	0.17
18.0	18.5	263	0.37	0.27	0.30	0.23
18.5	19.0	340	0.44	0.39	0.48	0.35
19.0	19.5	414	1.22	1.11	0.54	0.39
19.5	20.0	406	0.87	0.60	0.66	0.54
>20.0		151	0.94	1.03	0.73	0.63
Всего		2002	0.77	0.67	0.50	0.39

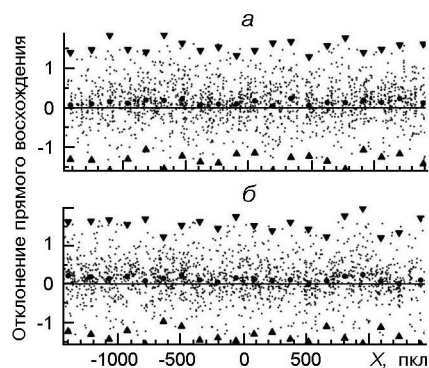
Таблица 7. Распределение позиционных ПЗС-измерений нумерованных астероидов с критическими значениями отклонений по прямому восхождению и по склонению

Отклоне- ние	Прямое восхождение		Склонение		Прямое восхождение		Склонение	
	Доля, %	Количество	Доля, %	Количество	Доля, %	Количество	Доля, %	Количество
	ПО «Astrometrica»				ПО CoLiTec			
< 1	92.9	1937	96.8	1937	93.8	1877	97.4	1949
< 2	6.2	57	2.8	57	5.6	113	2.5	50
< 3	0.7	2	0.1	2	0.6	12	0.1	2
< 4	0.0	1	0.0	1	0.0	0	0.0	1
4	0.2	5	0.2	5	0.0	0	0.0	0
Всего	100	2002	100	2002	100	2002	100	2002

Позиционные ПЗС-измерения, однако, были переобработаны при помощи предпоследней версии ПО CoLiTec (осень 2014 г.).

Всего было использовано 2002 позиционных ПЗС-измерения. ПО CoLiTec было сделано на 253 ПЗС-измерения больше. По указанным 253 ПЗС-измерениям ПО «Astrometrica» выдала признак невозможности гарантировать достоверное ПЗС-измерение положения объекта (Centroid = 1). Это часто связано с попыткой измерить положение смазанных объектов [2] «star trails» или слабых объектов [8], находящихся на изображении рядом с яркими звездами. Более половины из них имеют ОСШ, не превышающее 3.5 (табл. 3).

Рис. 7. Зависимость отклонений по прямому восхождению от абсциссы кадра: *а* — ПО CoLiTec, *б* — ПО «Astrometrica» (серые точки — единичные ПЗС-измерения, черные точки — средние значения отклонений, треугольники — уровень отклонений 3σ)



Общие характеристики точности позиционных ПЗС-измерений приведены в табл. 4. При малых значениях *ОСШ* (табл. 5, 6) ПЗС-измерения ПО «Astrometrica» имеют на 30—50 % большее СКО, чем ПО CoLiTec (рис. 5, 6). Средние отклонения ПО CoLiTec и «Astrometrica» в общем случае примерно одинаковы, и поэтому данные по ним не приведены. Для получения эталонных значений положений объектов использовался сервис HORIZONS (<http://ssd.jpl.nasa.gov/?horizons>). Также ПО CoLiTec имеет меньшую частоту критических отклонений (табл. 7, рис. 7).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования подтвердили высокую точность позиционных ПЗС-измерений ПО автоматического поиска астероидов и комет на серии ПЗС-кадров при помощи программного обеспечения CoLiTec [8, 9, 20], созданной в рамках Украинской виртуальной обсерватории [3, 23].

По данным MPC (<http://www.minorplanetcenter.net/iau/special/residuals2.txt>) средние ошибки позиционных ПЗС-измерений ПО CoLiTec и СКО позиционных ПЗС-измерений, выраженные в пикселях, одни из наименьших среди лучших 30 обсерваторий по количеству позиционных ПЗС-измерений астероидов в 2012 г. (табл. 1, рис. 2) и наименьшие среди обсерваторий, использующих телескопы с малой апертурой. При этом по суммарным итогам 2011 и 2012 гг. обсерватория ISON NM заняла седьмое место в мире как по количеству позиционных ПЗС-измерений, так и по числу открытий.

Сравнение статистических характеристик позиционных ПЗС-измерений ПО CoLiTec и «Astrometrica» по одному и тому же набору тестовых кадров свидетельствует, что пределы достоверных позиционных ПЗС-измерений ПО CoLiTec шире, чем у ПО «Astrometrica», а расширение соответствует области предельно малых *ОСШ*, в результате чего находятся объекты, которые не замечает глаз. При этом область малых *ОСШ* ценна тем, что в ней лежит все новое. При $ОСШ > 6$ результаты примерно одинаковы.

Авторы выражают благодарность академику НАН Украины Я. С. Яцкиву за постоянную поддержку исследований в этом направлении в рамках проектов Украинской астрономической ассоциации.

1. *Безкровный М. М., Даикова А. Н., Соковицова Н. С. и др.* Методы исследования статистических характеристик CCD-измерений положений и блеска объектов солнечной системы // Восточно-Европейский журн. передовых технологий.—2015.—2/2 (22).—С. 26—37.
2. *Безкровный М. М., Хламов С. В., Саваневич В. Е. и др.* Подпиксельный метод оценки местоположения объектов с изображением, смазанным собственным движением // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України.—2013.—№ 3 (12).—С. 128—131.
3. *Вавилова И. Б., Пакуляк Л. К., Шляпников А. А. и др.* Астроинформационный ресурс Украинской виртуальной обсерватории (УкрВО): объединенный архив данных наблюдений, научные задачи и программное обеспечение // Кинематика и физика небес. тел.—2012.—28, № 2.—С. 59—80.
4. *Деденок В. П., Саваневич В. Е.* Ієрархічний метод виявлення малорозмірного рухомого об'єкта // Системи озброєння та військова техніка.—2005.—№ 1.—С. 40—45.
5. *Саваневич В. Е., Кожухов А. М., Брюховецкий А. Б. и др.* Метод сложения ПЗС-кадров с накоплением сигнала от астероида со слабым блеском и ненулевым видимым движением на серии ПЗС-кадров // Системи озброєння та військова техніка.—2010.—Вып. 3 (23).—С. 154—159.
6. *Саваневич В. Е.* Определение координат статистически зависимых объектов на дискретном изображении // Радиоэлектроника и информатика.—1999.— № 1.—С. 4—8.
7. *Саваневич В. Е., Брюховецкий А. Б., Кожухов А. М. и др.* Оценка координат астероида на дискретном изображении // Радиотехника.—2010.—Вып. 162.—С. 78—86.
8. *Саваневич В. Е., Брюховецкий А. Б., Кожухов А. М. и др.* Программа CoLiTec автоматизированного обнаружения небесных тел со слабым блеском // Космічна наука і технологія.—2012.—18, № 1.—С. 39—46.
9. *Свід. про реєстр. авт. права № 47290.* Україна. Комп'ютерна програма «Програма автоматизованого відкриття астероїдів та комет на серії ПЗС-кадрів CoLiTec» / В. Є. Саваневич, О. Б. Брюховецький, О. М. Кожухов, Є. М. Діков, В. П. Власенко, Л. В. Єленін, М. М. Безкровний, О. Б. Анненков, О. В. Герасименко.— Прийнято 21.01.13.
10. *Свід. про реєстр. авт. права № 54900.* Україна. Комп'ютерна програма «Програма обробки та відображення астрономічних кадрів LookSky-CoLiTec» / Є. М. Діков, О. Б. Брюховецький, С. В. Хламов, В. Є. Саваневич, В. П. Власенко, Л. В. Єленін, О. В. Герасименко, М. М. Безкровний, Н. С. Соковікова, Я. С. Мовсесян, А. В. Погорелов.— Прийнято 20.05.14.
11. *Соковицова Н. С., Саваневич В. Е., Безкровный М. М. и др.* Оценка координат близких астероидов на ПЗС-изображении // Восточно-Европейского журн. передовых технологий.—2013.—4/4 (64).—С. 41—45.
12. *Соковицова Н. С., Саваневич В. Е., Безкровный М. М. и др.* Подпиксельный метод оценки местоположения близких астероидов на дискретном изображении // Радиоелектронні і комп'ютерні системи.—2013.—№ 3 (62).—С. 32—38.
13. *Burtz D. C.* Asteroid orbit determination and rotational period calculations with CCD astronomy // Masters Thesis, AD-A356383, AFIT-TR-98-102.— 1998.

14. *Edwin L. Aguirre* comets, asteroids, and «Astrometrica» // *Sky and Telescope*.— 1997.—P. 72—74.
15. *Ericson J.* Asteroids, comets, and meteorites. *Cosmic Invaders of the Earth*. — New York: Fact on File, 2003.
16. *Hudkova L. A., Gorel G. K., Ivantsov A. V.* CCD observations of minor planets in Mykolaiv in 2002 — 2003 // *Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel. Suppl.*—2005.— N 5.—P. 431—433.
17. *Kortencamp S.* Asteroids, comets, and meteoroids. — Mankato, MN: Capstone Press, 2012.—32 p.
18. *Miller P. J., Jeffrey D. W., Holmes R. E., et al.* An international asteroid search campaign — *Astronomy education review* — V. 7, (1) (February 2008): 57—83. DOI: 10.3847/AER2008006
19. *Rivkin A. S.* Asteroids, comets and dwarf planets. — Greenwood Press, 2009.
20. *Savanevych V. E., Briukhovetskyi O. B., Elenin L. V., et al.* A new method based on the subpixel Gaussian model for accurate estimation of asteroid coordinates // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2015.—**451**, N 3.—P. 3287—3298.
21. *Vavilova I. B., Pakuliak L. K., Protsyuk Yu. I.* Ukrainian Virtual Observatory (UkrVO). The goals, structure, and tasks // *Kosmichna Nauka i Tekhnologiya*.—2010.—**16**, N 5.—P. 62—70.
22. *Vavilova I. B., Pakuliak L. K., Protsyuk Yu. I., et al.* Ukrainian Virtual Observatory: Current status and perspectives of development of joint archives of observations // *Kosmichna Nauka i Tekhnologiya*.—2011.—**17**, N 4.—P. 74—91.
23. *Vavilova I. B., Pakuliak L. K., Protsyuk Yu. I., et al.* UkrVO joint digitized archive and scientific prospects // *Baltic Astronomy*.—2012.—**21**.—P. 356—365.
24. *Zacharias N., Finch C. T., Girard T. M., et al.* The Fourth US Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC4) // *Astron. J.*—2013.—**145**, N 2.—P. 44.

Стаття надійшла до редакції 08.05.15