

УДК 520.8, 523.482

**Л. В. Казанцева<sup>1</sup>, С. В. Шатохина<sup>2</sup>, Ю. И. Процюк<sup>3</sup>,  
О. Э. Ковылянская<sup>3</sup>, В. Н. Андрук<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Астрономическая обсерватория  
Киевского национального университета имени Тараса Шевченко  
ул. Обсерваторная 3, Киев-53, 04053

<sup>2</sup>Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины  
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03680

<sup>3</sup>Научно-исследовательский институт «Николаевская астрономическая обсерватория»  
Госинформнауки Украины  
ул. Обсерваторная 1, Николаев, 54030  
e-mails: kazl@ukr.net; svetash@mao.kiev.ua; procsys@gmail.com; andruk1058@ukr.net

## **Результаты обработки оцифрованных фотографических наблюдений Плутона из коллекций Украинской виртуальной обсерватории**

*На основе оцифрованных фотографических наблюдений из коллекции объединенного цифрового архива Украинской виртуальной обсерватории, полученных на пяти телескопах трех обсерваторий Украины, составлен каталог 59 экваториальных координат и звездных величин системы Плутон — Харон за период 1961—1990 гг. Успешно применено разработанное ранее программное обеспечение и методика обработки сканов, проанализированы параметрические модели обработки. Средняя погрешность определения экваториальных координат опорных звезд каталога «Tycho-2» по оцифрованным астронегативам составляет  $\pm 90$  мсд. Средняя ошибка определения звездных величин  $B_T$  в системе каталога «Tycho-2» равна  $\pm 0.32^m$ . Координаты Плутона сравнены с эфемеридой JPL PLU43-DE431.*

*РЕЗУЛЬТАТИ ОБРОБКИ ОЦИФРОВАННИХ ФОТОГРАФІЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ПЛУТОНА ІЗ КОЛЕКЦІЙ УКРАЇНСЬКОЇ ВІРТУАЛЬНОЇ ОБСЕРВАТОРІЇ, Казанцева Л. В., Шатохіна С. В., Процюк Ю. І., Ковилянська О. Е., Андрук В. М. — На основі оцифрованих фотографічних спостережень з колекції об'єднаного цифрового архіву Української віртуальної обсерваторії, отриманих на п'яти телескопах трьох обсерваторій України, складено каталог 59 екваторіальних координат і зоряних величин системи Плутон — Харон за пе-*

ріод 1961—1990 рр. Успішно застосовано розроблене раніше програмне забезпечення і методику обробки сканів, проаналізовано параметричні моделі обробки. Середня похибка визначення екваторіальних координат опорних зірок каталогу «Tycho-2» за оцифрованими астронегативами становить  $\pm 90$  мсд. Середня похибка визначення зоряних величин  $B_T$  у системі каталогу «Tycho-2» дорівнює  $\pm 0.32^m$ . Координати Плутона порівнюються з ефемеридою JPL PLU43-DE431.

*OUR PROCESSING RESULTS OF DIGITIZED PHOTOGRAPHIC OBSERVATIONS OF UKRAINIAN VIRTUAL OBSERVATORY PLUTO COLLECTIONS, by Kazantseva L. V., Shatokhina S. V., Protsyuk Yu. I., Kovylianska O. E., Andruk V. M. — We compiled the catalogue of 59 equatorial coordinates and magnitudes of the Pluto — Charon system for the interval from 1961 to 1990 which is based on digitized photographic data of the Joint Digital Archive of the Ukrainian Virtual Observatory. They include observations of five telescopes of three Ukrainian observatories. We successfully applied the developed software and methodics for scan processing. The parametric processing model was analyzed. The average accuracy for the equatorial coordinates of Tycho-2 reference stars on the digitized plates of the five telescopes is  $\pm 90$  mas. The mean error of Tycho-2  $B_T$  magnitudes is  $\pm 0.32^m$ . The Pluto positions were compared with the ephemeris JPL PLU43-DE431.*

## ВВЕДЕНИЕ

Плутон, карликовая планета пояса Койпера (134340 Pluto), все еще остается одним из малоизученных объектов Солнечной системы. Удаленность, размеры и наклон орбиты к эклиптике усложняют наземные наблюдения планеты — с момента открытия и до сегодняшнего дня наблюдения охватывают только 34 % ее орбиты. Особый интерес накануне ожидаемого в 2015 г. сближения с Плутоном космического аппарата миссии NASA «New Horizons» представляют как методы отслеживания движения далеких тел Солнечной системы в целом, так и уточнения положений самого Плутона [3, 16].

Точность теорий движения планет и построенных на их основе эфемерид сегодня напрямую зависит от использованных для корректировки наблюдательных рядов, которые, в свою очередь, отличаются по типу наблюдений, точности измерений и протяженности [28]. Для многих тел Солнечной системы уже накоплено достаточно большое количество результатов наблюдений космических миссий, наземной лазерной и радиолокации, ПЗС-наблюдений [15]. Но для Плутона все еще актуальными остаются данные классических наземных измерений (см. табл. 1).

Современные эфемериды серий DE Лаборатории реактивного движения (NASA, США) [10], INPOP Института небесной механики и

**Таблица 1. Наблюдательные данные, использованные для корректировки эфемериды DE421**

Объект	Метод, количество и период наблюдений					
	Лазерная локация	Радио-локация	Космические миссии	ПЗС	Меридианные	Фотографические
Луна	16601 1977—2007					
Меркурий		857 1966—1997	2 1974—1975			
Венера		2203 1962—1995	14335 1990—2007			
Марс			489327 1976—2007			
Юпитер			30 1973—2000	2533 1998—2007	3288 1914—1994	
Сатурн			34 1979—2006	3931 1998—2007	2756 1913—1998	
Уран				1959 1998—2007	3643 1914—1998	
Нептун				1855 1998—2007	3678 1913—1999	
Плутон				970 1998—2007	413 1989—1999	456 1914—2001

**Таблица 2. Наблюдательные данные положений Плутона, размещенные в CDS**

Название каталога	Количество положений	Период наблюдений	Метод наблюдений	Литературный источник
Ryl'kov+, 1996 г.	55	1991—1994 гг.	Фотографический	[23]
СМС, 1999 г.	380	1995—2001 гг.	Меридианный	[14]
Rapaport+, 2002 г.	105	1995—2001 гг.	Меридианный	[20]
Rizvanov+, 2005 г.	20	1985—1991 гг.	Фотографический	[22]
Beauvalet+, 2013 г.	242	1997—2010 гг.	ПЗС	[12]
Всего	802	1985—2010 гг.		

вычисления эфемерид (IMCCE, Франция) [27], ЕРМ Института прикладной астрономии (ИПА РАН, Россия) [19], как и предыдущие, дают некоторые отличия положений Плутона на разных промежутках времени. В то же время наблюдательных данных, доступных для сравнения с эфемеридами, не так уже и много. На сегодня в базе данных Страсбургского центра астрономических данных (CDS) доступны для анализа только 802 положения Плутона в пяти каталогах (см. табл. 2).

В то же время уточнения имеющейся эфемериды небесного тела с использованием его новых наблюдений, т. е. наблюдений, не учтенных при построении рассматриваемой эфемериды, позволяет не только воспроизводить истинную траекторию с точностью до ошибок наблюдений, но и оценивать дополнительные возмущения и величины отдельных констант в динамических моделях этого тела.

Сравнение эфемеридных и наблюдательных данных в положениях Плутона уже позволили ранее выявить ряд недостатков. Эфемерида DE200 (1980 г.), для построения которой не было использовано достаточного количества реальных положений Плутона [3], показала систематические расхождения с наблюдениями. Так, координаты фотоцентра системы Плутон — Харон, полученные в 1994 г. из меридианных ПЗС-наблюдений (Митаки, Япония) дали смещения  $O - C$  до 2.0—2.5 сд (секунд дуги) в прямом восхождении [32]. Примерно такие же смещения были получены из обработки фотографических наблюдений на пулковском нормальном астрографе, латвийском телескопе системы Шмидта в Балдонэ и на телескопе Цейс-400 Северо-Кавказской станции обсерватории Казанского университета [20, 24, 25].

Оценка расхождений предвычисленных положений Плутона с моментами покрытий планетой звезд в 2005—2008 гг. и параллельными позиционными ПЗС-наблюдениями планеты (эфемерида DE418 plu017, звездный каталог UCAC2) показали явный тренд значений ( $O - C$ ) и периодичность значений ( $O - C$ ) с периодом приблизительно 2.5 года и амплитудой почти 60 мсд [11].

Новые эфемериды, несмотря на свою заявленную внутреннюю точность, нуждаются в сравнениях с наблюдениями на разных временных участках. Пополнение наблюдательного ряда, особенно за период отсутствия космических миссий, должны содействовать улучшению точности и корректности планетных эфемерид.

### **ЦИФРОВЫЕ АРХИВЫ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ФОТОИЗОБРАЖЕНИЙ — НОВЫЙ ЭТАП ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАНИХ НАБЛЮДЕНИЙ**

Одним из источников наблюдательной информации за длительные промежутки времени служат современные цифровые архивы фотографических снимков. Фотографической астрономии уже около 140 лет, накоплено более семи миллионов фотографических стеклянных пластинок и пленок в более чем 100 обсерваториях мира, из которых оцифровано и описано более 450 тематических коллекций [21]. Эти данные используются для выведения высокоточных собственных движений звезд, выявления двойных и кратных систем, изучения кинематических подсистем, уточнений теорий движения спутников планет и астероидов.

В последней версии (2012 г.) Каталога архивов широкоформатных пластинок (CWFPA 5.8) значится 604831 снимков в 137 архивах, из них пластинок с изображениями Плутона только 336 [30]. Опубликованы несколько работ по вопросам переобработки фотографических наблюдений предыдущих лет, предложены новые алгоритмы и подходы к астрометрической обработке подобных изображений, частично выполнено их сравнение [3, 17, 21].

Ряды фотографических наблюдений Плутона, как правило, в свое время уже обрабатывались с использованием измерительных машин.

Положения планеты определялись относительно разных систем отсчета и были искажены систематическими ошибками звездных каталогов. Стандартные ошибки таких обработок оценивались значениями 0.2—0.4 сд. Улучшение позиционных данных ожидается из переработки оцифрованных фотографических изображений с высококачественными сканерами или камерами и современными астрометрическими каталогами. Точность ограничивается качеством изображений, систематическими ошибками координат и собственных движений звезд [17].

Процесс сканирования также вносит дополнительные ошибки, которые необходимо изучить и учесть для каждого конкретного сканирующего устройства. Разные тестовые исследования выявили основные причины искажений изображений во время сканирования [8]. По координате  $X$  — это непрямолинейность или прогиб направляющей в вертикальной и горизонтальной плоскостях (до 30 и 10—30 мкм соответственно); наличие эксцентриситета ролика на свободном конце каретки светоприемника (до 30 мкм), дисторсия объектива (30—40 мкм). Для координаты  $Y$  искажения, связанные с перекосами каретки в процессе ее перемещения и ошибками позиционирования, могут достигать 60—70 мкм.

Процесс оцифровки астрономических фотографических снимков, хранение полученных изображений и их обработка — актуальная проблема современной астрометрии. Для объединения архивов астрономических наблюдений украинских обсерваторий был реализован проект Украинской виртуальной обсерватории (УкрВО). В рамках этого проекта созданы базы данных для хранения астрономических данных и изображений, которые обеспечивают поиск и доступ к наблюдательным данным во всех диапазонах длин волн всего разнообразия небесных объектов, которые были доступны для наблюдений на территории Украины в XX — начале XXI века. Современная реализация УкрВО обеспечивает поиск и фильтрацию данных, возможность регулярного пополнения данными современных проектов наблюдений в любых технологических решениях, осуществление процесса анализа и использования данных [4, 5].

## НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ И АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ

По состоянию на 2014 г. в объединенный цифровой архив УкрВО [6, 31] включены данные о 77 фотографических пластинках с изображением Плутона, но только 59 из них оказались пригодными для обработки. Целью данной работы есть получение экваториальных координат планеты Плутон (или системы Плутон — Харон) посредством обработки оцифрованных астронегативов из коллекций УкрВО. При этом оценивалась точность сканирования и первичной обработки данных используемых сканеров, алгоритмов редукции и в целом про-

Таблица 3. Данные о наблюдательном материале с изображениями Плутона

Номер телескопа (код)*	Обсерватория	Количество пластинок	Инструмент**	Период наблюдений	Размер пластинки, см	Масштаб изображений (сканирования), сд/мм (сд/пкл)
1 (083)	ГАО НАНУ	2	ДДА	1961—1979	24 24	38 (0.79)
2 (083)	ГАО НАНУ	23	ДША	1979—1989	30 30	103 (2.17)
3 (085)	АО КНУ	22	АМР	1986—1990	16 16	48 (1.06)
4 (585)	АО КНУ	2	АЗТ-8	1987	13 13	91 (2.14)
5 (089)	НИИ НАО	10	ЗА	1961—1968	20 20	101 (2.13)
		59		1961—1990		

\* Код по списку Марседена

\*\* ДДА — двойной длиннофокусный астрограф ( $F/D = 5500/400$  мм), ДША — двойной широкоугольный астрограф ( $F/D = 2000/400$  мм), АМР — астрограф Мерца — Репольда ( $F/D = 4260/200$  мм), АЗТ-8 — астрономический зеркальный телескоп-8 ( $F/D = 11200/700$  мм), ЗА — зонный астрограф Цейса ( $F/D = 2040/120$  мм)

граммного комплекса обработки оцифрованных изображений. Выполнено сравнение полученных результатов с другими подобными обработками на предмет согласования современных эфемерид с результатами предыдущих наблюдений.

Все пластинки сканировались на сканерах типа «Epson» с пространственным разрешением 1200 dpi, средний масштаб сканирования составлял от 0.79 до 2.17 сд/пкл в зависимости от телескопов. Данные о наблюдательном материале приведены в табл. 3 и первых четырех графах табл. 4.

Оцифрованные изображения звездных полей в виде файлов FITS-формата обрабатывались в автоматическом режиме программой, созданной в среде MIDAS/ROMAFOT для получения астрометрических и фотометрических характеристик зарегистрированных объектов [18]. Этапы обработки оцифрованных пластинок и исследование сканеров на систематические и случайные ошибки изложены в работах [1, 2, 7]. Отметим, что полученные для объектов прямоугольные координаты  $X$ ,  $Y$ , исправленные за систематические ошибки сканеров, преобразовывались в систему тангенциальных координат посредством формул Тернера (полные полиномы шестого или третьего порядка для ДША или ДДА, АМР, ЗА соответственно) с учетом комы и уравнения блеска. В качестве опорной системы для получения экваториальных координат использовался каталог «Tycho-2». В табл. 4 приведены данные о наблюдательном материале и результатах обработки пластинок. Указаны номер телескопа, номера пластинок, размер обработанного поля в квадратных градусах, время экспозиции в минутах, количество использованных опорных звезд «Tycho-2», дата наблюдений, топоцентрические экваториальные координаты Плутона, средние квадратичные ошибки редукции координат и фотометрических величин опорных звезд, звездная величина планеты в системе  $B_T$ . Результаты сканирования и астрометрической обработки оцифрованных астронегативов отдельно для каждого телескопа представлены на рис. 1,  $a—z$ . На

Таблица 4. Результаты обработки 59 пластинок с зарегистрированным изображением Плутона

Номер телескопа	Номер пластинки	Поле, град <sup>2</sup>	t, мин	k	Дата, UTC	$\alpha_{2000}$ ICRF	$\delta_{2000}$ ICRF	, мсд	, мсд	m	B <sub>T</sub>
1	1782	4.8	90	107	1961 02 15:055088	10 <sup>h</sup> 58 <sup>m</sup> 06.665 <sup>s</sup>	+20 47 37.781	69	137	0.43 <sup>m</sup>	16.10 <sup>m</sup>
1	5937	4.3	60	109	1979 02 21.067770	13 37 33.608	+8 40 57.665	45	71	0.31	14.52
2	1229	55.5	10	1035	1979 05 24.846209	13 29 33.671	+9 31 30.559	65	83	0.35	14.03
2	1230	56.9	10	1034	1979 05 24.846209	13 29 33.678	+9 31 31.243	82	91	0.38	13.79
2	1623	58.6	6	1317	1980 02 12.990412	13 47 03.638	+7 39 04.398	105	106	0.30	14.67
2	1624	56.4	6	1230	1980 02 12.990412	13 47 03.625	+7 39 03.465	111	114	0.37	13.65
2	1645	56.4	10	1252	1980 02 16.027566	13 46 58.099	+7 41 16.847	105	109	0.38	13.95
2	1646	57.1	10	942	1980 02 16.027566	13 46 58.158	+7 41 16.842	90	129	0.35	13.49
2	1685	52.3	10	876	1980 03 14.991693	13 45 20.539	+8 03 00.959	97	114	0.34	13.57
2	1686	56.7	10	877	1980 03 14.991693	13 45 20.514	+8 03 01.118	71	173	0.40	13.72
2	1717	56.5	19	1296	1980 04 15.969857	13 42 20.400	+8 25 06.688	86	84	0.31	14.61
2	1718	57.5	19	1237	1980 04 15.969857	13 42 20.433	+8 25 06.317	148	156	0.38	14.06
2	1726	58.6	22	1343	1980 04 17.904449	13 42 08.676	+8 26 08.920	135	135	0.36	13.87
2	1727	58.2	22	1385	1980 04 17.904472	13 42 08.691	+8 26 09.892	86	91	0.31	14.20
2	1929	57.6	30	1248	1981 04 24.902549	13 50 48.861	+7 32 34.596	116	120	0.41	13.85
2	1930	57.3	30	1263	1981 04 24.902560	13 50 48.893	+7 32 33.733	136	140	0.38	13.90
2	2306	55.3	35	622	1982 03 24.037986	14 03 17.697	+6 14 20.413	80	105	0.49	12.83
2	2307	57.2	35	914	1982 03 24.038055	14 03 17.680	+6 14 20.907	113	157	0.50	14.61
2	2367	57.5	60	1276	1982 05 13.884101	13 58 20.611	+6 41 21.410	114	115	0.41	13.60
2	2368	57.0	60	1262	1982 05 13.884136	13 58 20.673	+6 41 21.382	100	120	0.33	14.52
2	2451	40.6	32	893	1983 05 10.919465	14 08 01.201	+5 41 56.511	94	85	0.40	13.33

Продолжение табл. 4

Номер телескопа	Номер пластинки	Поле, град <sup>2</sup>	t, мин	k	Дата, UTC	<sup>2000</sup> ICRF	<sup>2000</sup> ICRF	, мсд	, мсд	m	B <sub>T</sub>
2	2453	57.2	30	1248	1983 05 13.883954	14 07 44.066	+5 42 45.693	133	132	0.38	13.84
2	2454	57.8	30	1293	1983 05 13.883954	14 07 44.129	+5 42 45.157	113	115	0.39	13.42
2	3321	56.2	30	1186	1989 02 11.110184	15 09 48.562	-1 10 11.841	123	122	0.40	13.18
2	3333	57.2	31	1260	1989 06 02.882125	15 02 08.942	-0 16 15.533	109	111	0.39	13.48
3	257004	2.1	60	49	1986 05 27.879850	14 34 33.217	+2 45 57.180	62	47	0.29	12.85
3	257005	2.6	30	56	1986 05 28.847130	14 34 27.864	+2 46 01.882	36	40	0.21	14.78
3	257006	2.9	30	59	1986 05 29.873252	14 34 22.445	+2 46 08.065	25	47	0.22	14.60
3	257007	2.8	23	58	1986 05 31.892130	14 34 11.765	+2 46 16.614	44	52	0.25	15.00
3	257008	2.5	20	65	1986 06 10.854086	14 33 23.825	+2 46 10.315	81	68	0.22	15.48
3	257009	2.6	30	62	1986 06 12.859190	14 33 15.026	+2 45 57.884	50	55	0.20	15.35
3	257010	2.5	38	61	1986 06 13.844201	14 33 10.950	+2 45 51.246	53	51	0.26	14.07
3	257011	2.8	30	65	1986 06 17.847442	14 32 55.045	+2 45 13.900	48	26	0.27	14.64
3	257012	2.7	28	65	1986 06 18.840579	14 32 51.351	+2 45 02.436	46	37	0.29	15.20
3	257014	2.8	30	61	1986 07 02.859028	14 32 09.605	+2 40 53.293	35	54	0.29	14.48
3	257015	2.7	30	69	1986 07 03.861111	14 32 07.358	+2 40 28.483	86	60	0.23	15.31
3	257016	2.7	40	63	1986 07 04.843079	14 32 05.456	+2 40 04.456	51	56	0.28	15.17
3	257017	2.3	30	61	1986 07 06.862847	14 32 01.631	+2 39 12.566	39	51	0.30	14.75
3	257018	2.0	30	54	1986 07 07.875000	14 31 59.987	+2 38 44.695	84	61	0.30	14.16
3	271001	3.1	41	63	1987 05 13.809907	14 45 20.892	+1 41 57.414	37	49	0.23	16.10
3	307004	2.7	37	57	1989 05 15.908229	15 03 55.991	-0 19 48.134	69	64	0.30	15.80
3	307001	3.0	30	62	1989 05 16.907708	15 03 49.765	-0 19 29.926	64	60	0.30	15.71



Окончание табл. 4

Номер телескопа	Номер пластинки	Поле, град <sup>2</sup>	t, мин	k	Дата, UTC	<sup>2000</sup> ICRF	<sup>2000</sup> ICRF	, мсд	, мсд	m	B <sub>T</sub>
3	307008	2.9	35	59	1989 05 19.908160	15 03 31.296	-0 18 41.272	56	68	0.29	14.22
3	307006	3.0	32	61	1989 06 18.869120	15 00 48.743	-0 16 33.436	56	76	0.34	15.85
3	307005	3.0	33	62	1989 06 18.907014	15 00 48.578	-0 16 33.885	64	100	0.34	15.31
3	307007	2.9	35	60	1989 06 23.878125	15 00 27.857	-0 17 19.608	57	113	0.35	15.74
3	308003	3.0	40	69	1990 05 26.833495	15 12 16.561	-1 18 30.196	75	52	0.31	15.52
4	272008	0.4	30	5	1987 07 08.847569	14 41 11.878	+1 38 47.478	280	149	-	14.76
4	272009	0.4	22	11	1987 07 09.856794	14 41 10.130	+1 38 20.704	283	378	0.57	13.53
5	11	23.5	62	645	1961 04 06.826854	10 53 26.366	+21 13 51.534	249	108	0.29	16.64
5	25	23.5	60	601	1961 04 15.827904	10 52 48.845	+21 15 26.699	96	82	0.25	15.57
5	155	23.4	60	618	1962 05 05.785522	11 00 09.845	+20 51 56.468	112	79	0.24	15.41
5	765	23.5	60	453	1965 04 06.870399	11 27 26.358	+19 27 03.891	135	64	0.27	16.35
5	1261	23.5	60	486	1967 02 17.996342	11 49 27.598	+17 50 46.560	83	75	0.22	15.18
5	1265	23.5	60	488	1967 02 20.007017	11 49 17.397	+17 52 23.370	95	83	0.24	15.59
5	1276	23.5	60	508	1967 03 02.964517	11 48 18.158	+18 00 53.060	255	74	0.24	15.46
5	1530	23.5	60	483	1968 03 22.948007	11 55 08.555	+17 38 44.723	90	70	0.24	15.04
5	1553	23.5	60	464	1968 03 29.948285	11 54 27.694	+17 42 36.918	122	74	0.25	15.72
5	1557	23.5	60	477	1968 04 01.852140	11 54 11.242	+17 44 02.781	89	72	0.23	15.90

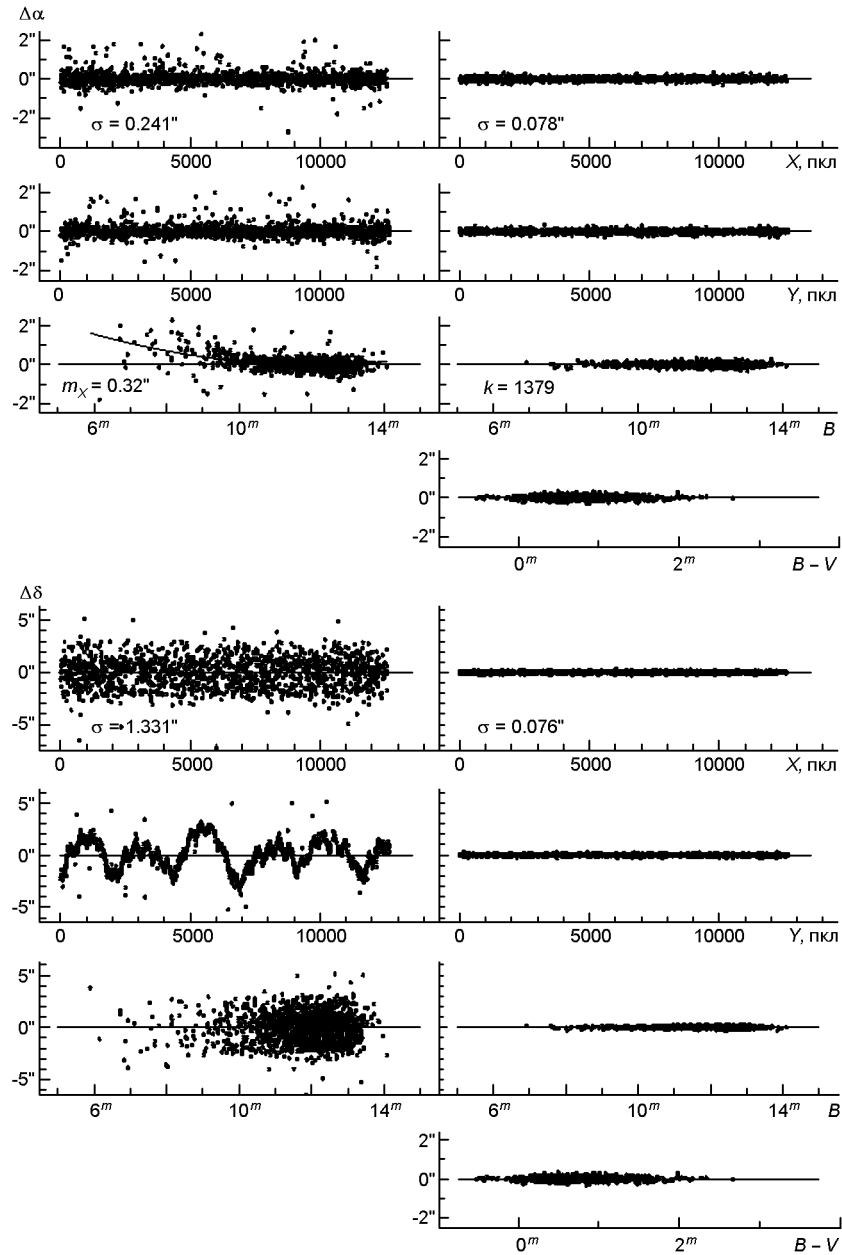


Рис. 1. Результаты астрометрической обработки сканированных астрофотографий, полученных на разных инструментах: а — пластинка № 1727 (ДША). Сканер «Epson Expression 10 000 XL»

них показаны разности  $\Delta\alpha$  и  $\Delta\delta$  между вычисленными и каталожными значениями экваториальных координат звезд каталога «Tycho-2» до и после исключения систематических ошибок сканеров (слева и справа соответственно). Указаны значения ошибок редукции экваториальных координат до и после исключения систематических ошибок сканеров, количество  $k$  опорных звезд каталога «Tycho-2», значения уравнения блеска  $m_x$ . Разности  $\Delta\alpha$  и  $\Delta\delta$  даны относительно прямоугольных координат пластинки  $X$  и  $Y$ , звездных величин  $B_T$  и показате-

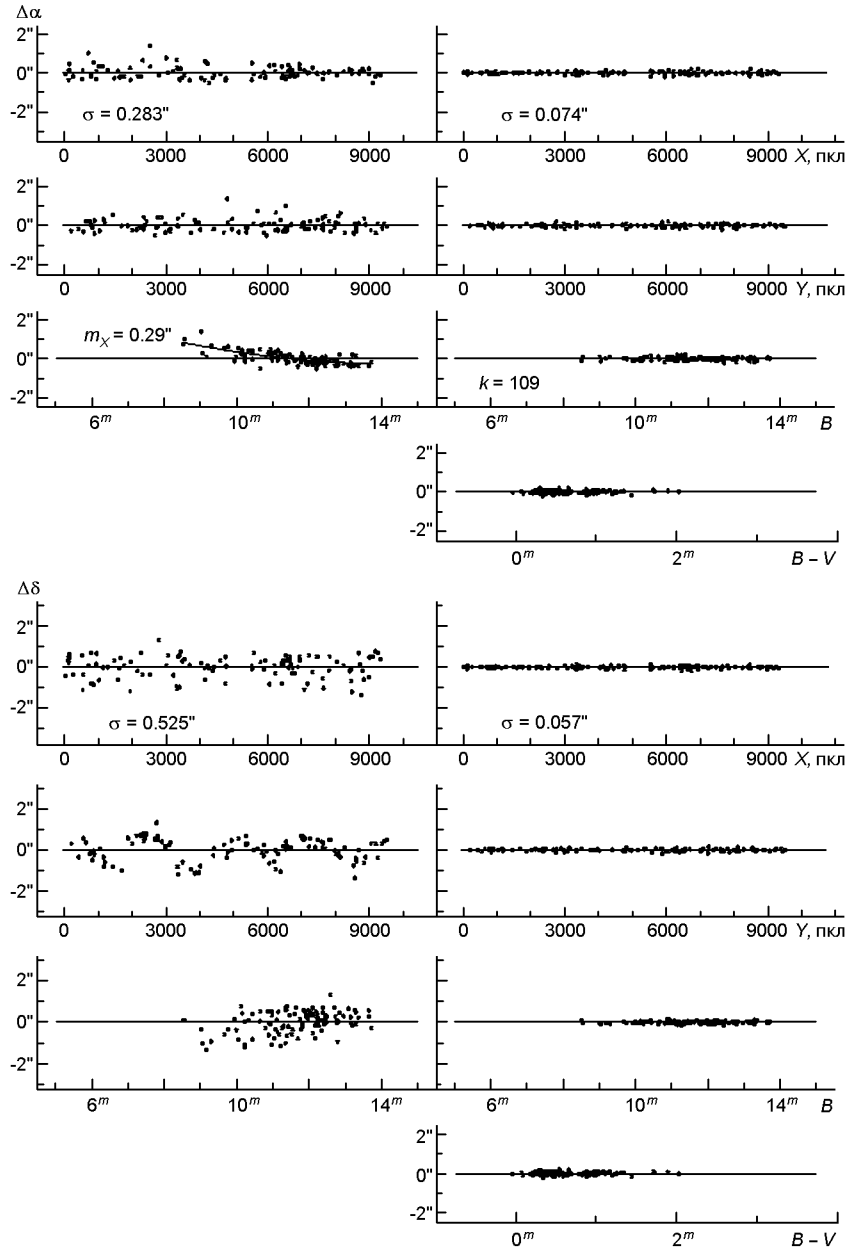


Рис. 1, б. То же для пластинки № 5937 (ДДА). Сканер «Epson Expression 10 000 XL»

лей цвета звезд  $B - V$ . Распределение систематических ошибок по полю пластинок слева на рис. 2,  $a-g$  показывает суммарный результат aberrаций оптики телескопов, остаточных ошибок экспонирования и обработки цифровых данных пластинок. Указаны ошибки разностей между использованными и линейными моделями редукции экваториальных координат. Справа на тех же рисунках для ячеек 250 250 пкл нанесены для опорных звезд разности экваториальных координат  $O - C$ . Горизонтальные и вертикальные черточки соответствуют отрицательным и положительным значениям  $\Delta\alpha$  и  $\Delta\delta$ .

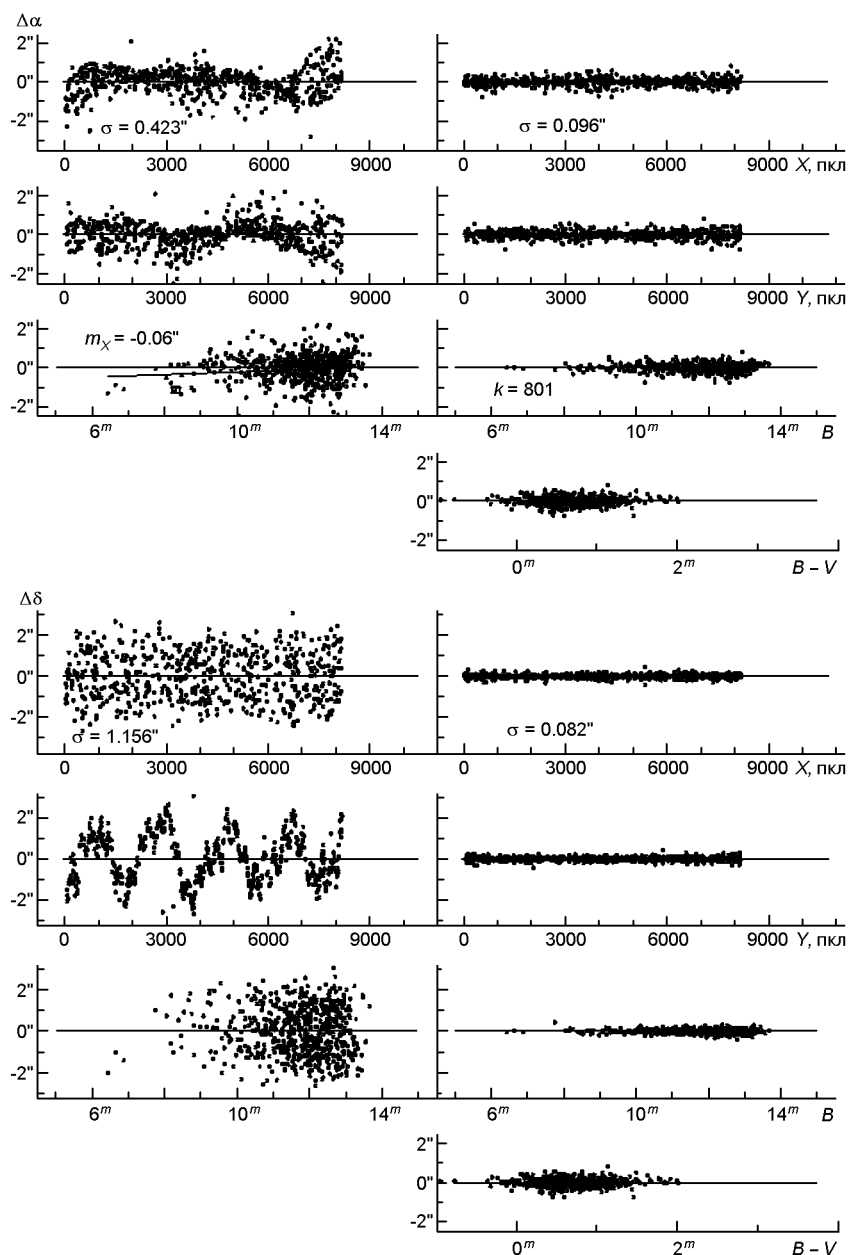


Рис. 1, в. То же для пластинки № 25 (3А). Сканер «Epson Perfection V750 Pro»

В процессе обработки изображений Плутона было использовано несколько версий программного комплекса, которые отличались подходами к аппроксимации и учету инструментальных поправок. Выбор был остановлен на модели обработки, которая в пределах погрешности повторяла значения предыдущей версии. Рис. 3 демонстрирует этот подход на примере двух пластинок разных инструментов. По оси  $X$  показаны модель 1, которая использовала полный полином второй степени и учитывала уравнение блеска, модель 2 — полином третьей

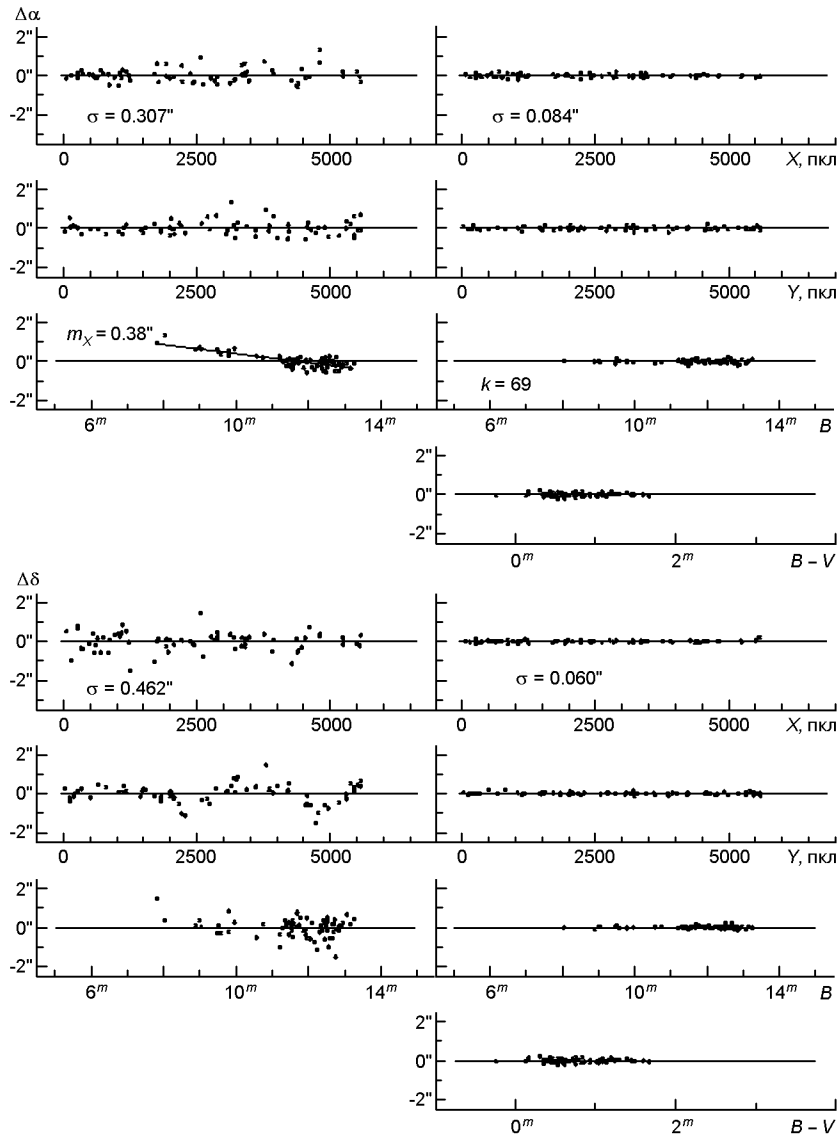


Рис. 1, 2. То же для пластинки № 257015 (AMP). Сканер «Epson Expression 10 000 XL»

степени, модель 3 — полином третьей степени с учетом уравнения блеска и комы с тремя членами, модель 4 — полином шестой степени.

На примере усредненных результатов шести независимых сканов каждой из пластинок Николаевской обсерватории (в XX столетии измерения этих пластинок не проводились) исследованы разные варианты обработки координат: с учетом трех или четырех итераций, с поворотом пластинки в сканере на  $90^\circ$ , с использованием разных списков опорных звезд «Гусно-2», ограниченных по звездной величине. Для этих вариантов рассматривалась как случайная ошибка определения координат Плутона отдельного скана по отношению к среднему, так и изменение разностей  $O - C$  для Плутона в зависимости от ис-

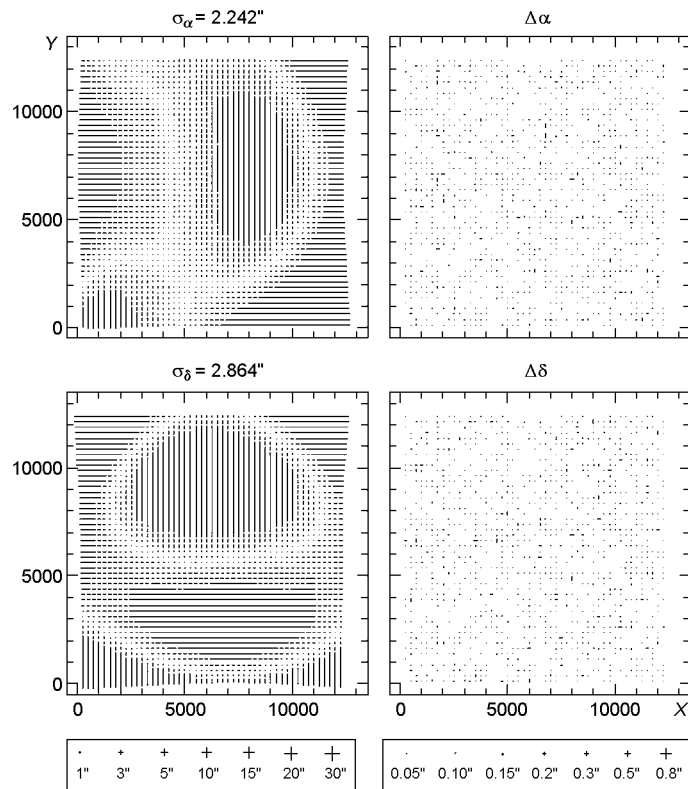


Рис. 2, а. Распределение ошибок, полученных в процессе обработки, по полю пластинки № 1727 (ДША)

пользованных опорных звезд. Среднее значение первой составляет 0.1 сд по  $\alpha$  и до 0.2 сд по  $\delta$  для отдельных пластинок. Максимальная разность в  $O - C$  Плутона при применении моделей обработки с разными списками (по количеству и звездной величине) опорных звезд составляет до 0.2 и 0.3 сд по обеим координатам соответственно. Наиболее оптимальный вариант обработки сканов пластинок НАО — использование прямого скана и всех опорных звезд «Tycho-2» для редуцированных вычислений. Возможность повышения точности и выравнивания ее по обеим координатам — в раздельном использовании координат  $X, Y$  двух сканов 0 и 90 (без измерений вдоль направления перемещения каретки сканера) и дальнейших их совместных решений.

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Распределение дат обработанных наблюдений для каждого телескопа и изменение координат  $\alpha, \delta$  Плутона за весь период наблюдений показаны на рис. 4. Отметим, что благодаря возможностям сканеров увеличилось количество пригодных для обработки астронегативов.

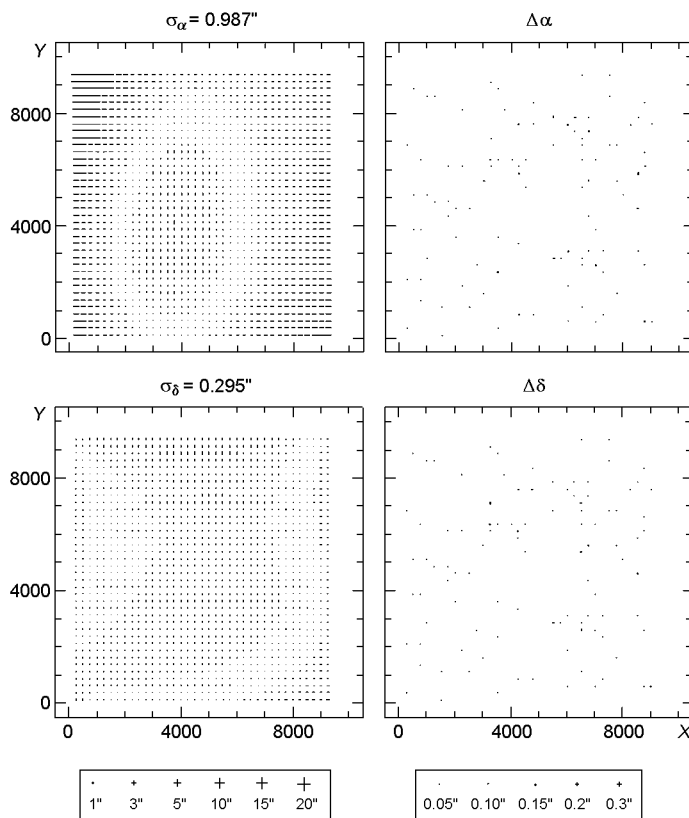


Рис. 2, б. То же для пластинки № 5937 (ДДА)

Полученные результаты сравнивались с классическими определениями положений Плутона по измерениям прямоугольных координат, с различными современными эфемеридами и с результатами других исследователей.

В табл. 5 представлены результаты сравнения полученных координат планеты из оцифрованных изображений с аналогичными значениями из измерений этих же пластинок в предыдущие годы [9, 26]. Видно, что существенно различаются как значения средних квадратичных ошибок, так и редукций пластинок по опорным звездам, так и разности  $O - C$  координат Плутона и эфемериды, усредненные по количеству одинаковых моментов наблюдений переобработанных пластинок. По этим данным можно сделать следующие выводы:

1) положения опорных звезд, полученные по цифровым изображениям, определены с внутренней точностью, в 2-3 раза лучшей, чем в аналогичных классических обработках, что есть результатом использования как современных каталогов, так и цифровых технологий измерений пластинок и их редукций;

2) положения Плутона, полученные по цифровым изображениям, отличаются от «классических» значений по обеим координатам в систематическом и (в меньшей мере) в случайном отношении.

Наблюдаемые положения центра изображения Плутона обрабо-

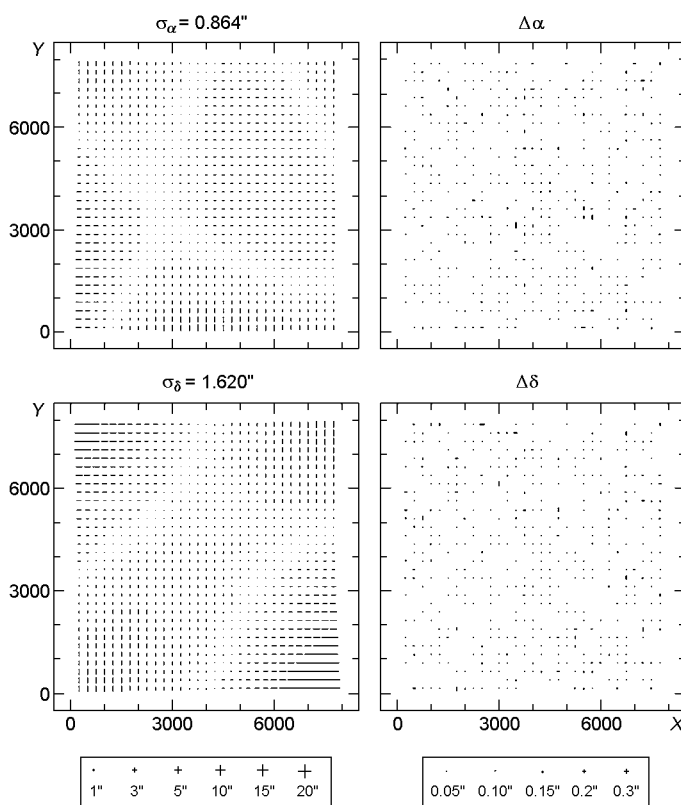


Рис. 2, в. То же для пластинки № 25 (3А)

танных пластинок были сравнены с современными эфемеридами, причем для каждой эфемериды выполнены вычисления в шести вариантах: для центра планеты (С) и для барицентра Плутон — Харон (В) по трем различным моделям планетной системы Плутона. На рис. 5 I точка — модель Buie В [13], II — Buie С, III — модель Beauvalet [12] В, IV — Beauvalet С, V — модель Tholen [29] В, VI — Tholen С.

В пределах точности вычислений в прямом восхождении на положение планеты не влияет выбор модели и центра, для которого проводятся астрометрические вычисления. Для склонения же центр положения для всех эфемерид влияет на результаты, причем во всех случаях вычисления относительно барицентра Плутон — Харон дают лучшие результаты, чем относительно центра самой планеты.

Рассмотрение результатов отдельно по моделям планетной системы показало, что только для эфемериды INPOP08 данные положений барицентра заметно отличаются, однако в пределах точности обработки это не существенно.

Распределение по времени величин  $O - C$  в координатах планеты показывает больший разброс значений по  $\delta$ , чем по  $\alpha$  (см. рис. 6). Кроме того, полученные нами результаты хорошо согласуются с аналогичными результатами других исследователей. На примере сравне-



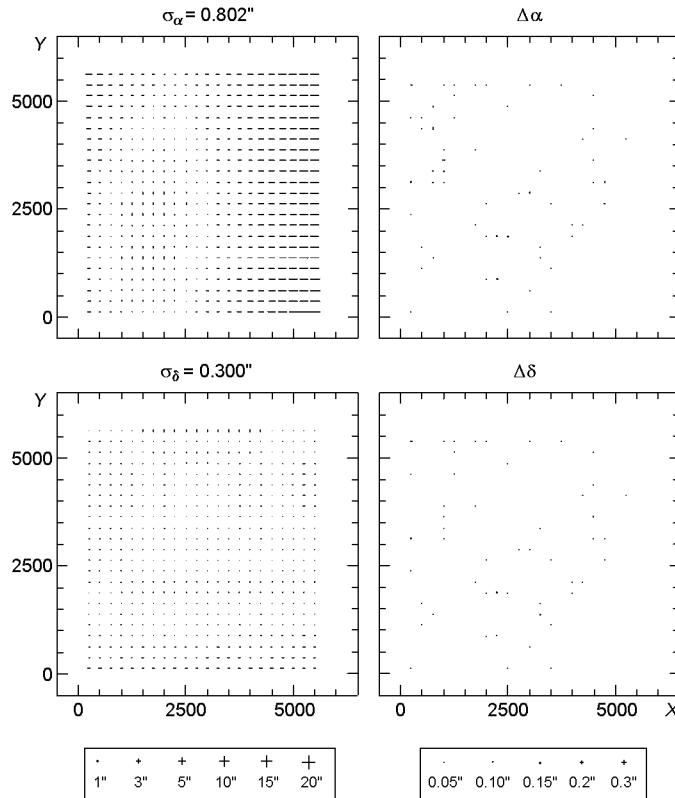


Рис. 2, г. То же для пластинки № 257015 (AMP)

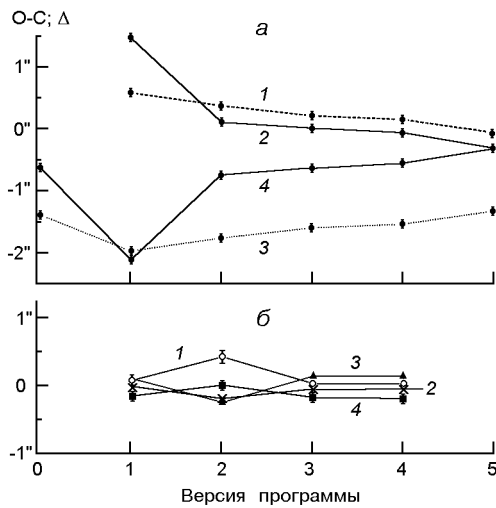


Рис. 3. Подбор параметров версий программы обработки на примере пластинок 257015 (а) и 5937 (б): кривая 1 — для , 2 — для , 3 — для (O - C) , 4 — для (O - C) ,

ний с эфемеридой DE200 заметно, что на ближайшие к созданию эфемериды годы (1980) расхождение наблюдений с данными эфемериды было минимальным, далее расхождения начали увеличиваться, особенно в прямом восхождении.

Использование архивов фотографических наблюдений Плутона трех обсерваторий позволило расширить временной интервал полученных положений до 30 лет. А применение одинаковых методик оци-

Рис. 4. Распределение наблюдений по времени (а, номер телескопа см. в табл. 3) и положения Плутона на небесной сфере на моменты наблюдений (б)

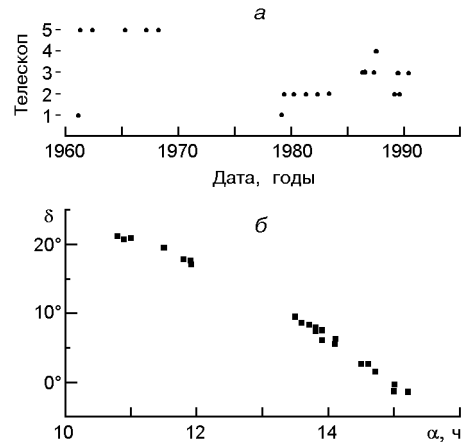


Таблица 5. Сравнение результатов обработки оцифрованных изображений с результатами предыдущих редукций пластинок с Плутоном

Телескоп	Количество пластинок	$k$	$\sigma$ , сд	$\sigma$ , сд	$N_i$ *	$(O - C)$ , сд	$(O - C)$ , сд	$(O - C)$ , сд	$(O - C)$ , сд
Обработка цифровых сканов (опорный каталог «Tycho-2»)									
ДДА	2	108	0.06	0.10	1	0.17	-0.31	—	—
ДША	23	1143	0.10	0.12	15	0.26	-0.17	0.45	0.54
АМР	22	61	0.06	0.06	9	-0.24	-0.11	0.66	0.53
АЗТ-8	2	8	0.28	0.26	1	-0.30	-0.29	—	—
ЗА	10	522	0.13	0.08	—	—	—	—	—
Классическая обработка измерений ПАРСЕК, КИМ-3, ДИП-1 (опорные каталоги АСТ, АГК-3)									
ДДА	1	19	0.20	0.24	1	-0.34	0.27	—	—
ДША	21	37	0.32	0.32	15	0.06	0.17	0.67	0.50
АМР	11	10	—	—	9	-0.81	-0.09	0.54	0.51
АЗТ-8	2	**	—	—	1	0.08	0.00	—	—

\*  $N_i$  — количество одинаковых моментов наблюдений

\*\* Вторичная система опорных звезд

фровки и обработки — получить достаточно однородный по ошибкам и источникам их возникновения каталог. Это дает возможность проанализировать значения  $O - C$ , полученные звездные величины Плутона и их изменения со временем и в зависимости от различных кинематико-динамических параметров системы Плутона. На рис. 7—9 для всех полученных положений Плутона приведены распределения  $O - C$  и звездных величин в зависимости от геоцентрического расстояния планеты и относительных разностей координат вида «Плутон — Харон». Среднее значение разностей  $B - V$  (где  $V$  — эфемеридное значение фотовизуальной звездной величины Плутона (включая Харон)) составляет  $0.82^m$ , средняя квадратичная ошибка изменения цвета —  $0.88^m$ . На значения  $O - C$  положений планеты влияет ее геоцентрическое расстояние и расстояния между Плутоном и Хароном. Последний факт требует дополнительных тщательных исследований. Как показывает также рис. 5, фотографические наблюдения прошлых лет поз-

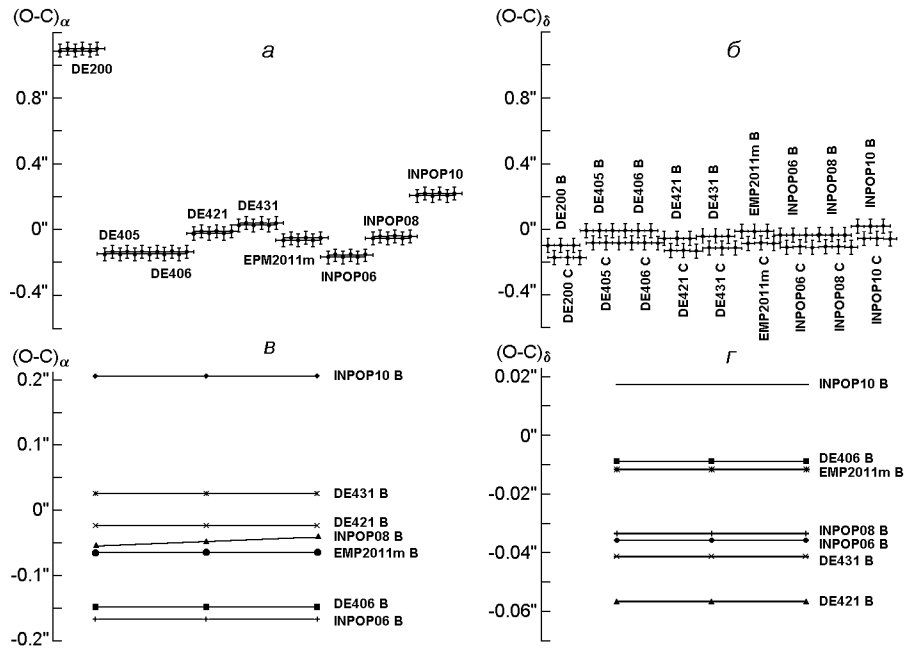


Рис. 5. Различие в данных положений Плутона для разных эфемерид (а, б) и разных моделей планетной системы (в, г) по прямому восхождению и склонению на примере  $O - C$  для момента наблюдений пластинки 257014 (1986.07.02 UT =  $20^h 37^m 00^s$ )

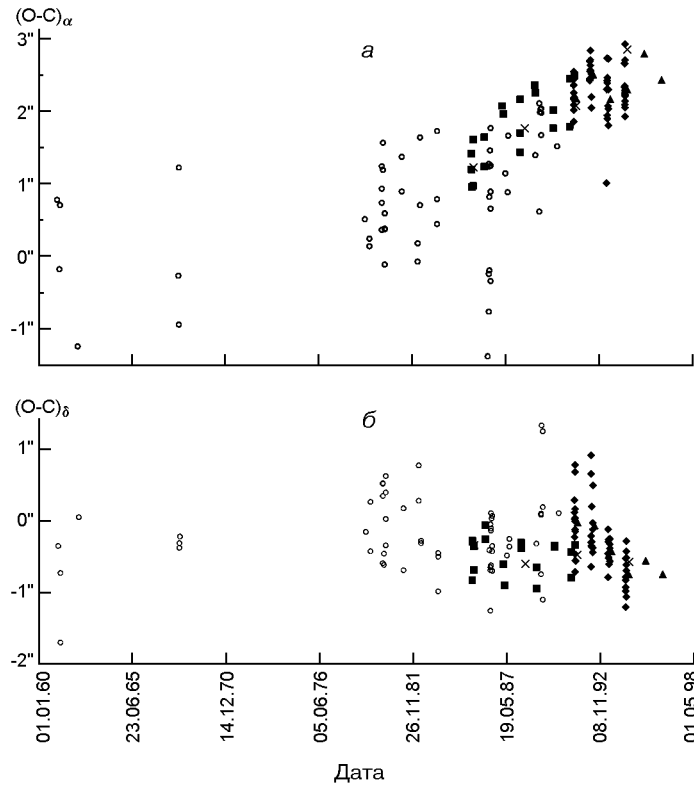


Рис. 6. Изменение значений  $O - C$  в координатах Плутона относительно эфемериды DE200 по разным опубликованным источникам и результатам обработки сканов объединенного цифрового архива УкрВО

Рис. 7. Зависимости разностей  $O - C$  Плутона от геоцентрических расстояний для коллекций разных обсерваторий (ромбики — ГАО НАН Украины, квадратики — АО КНУ, треугольники — НИИ НАО)

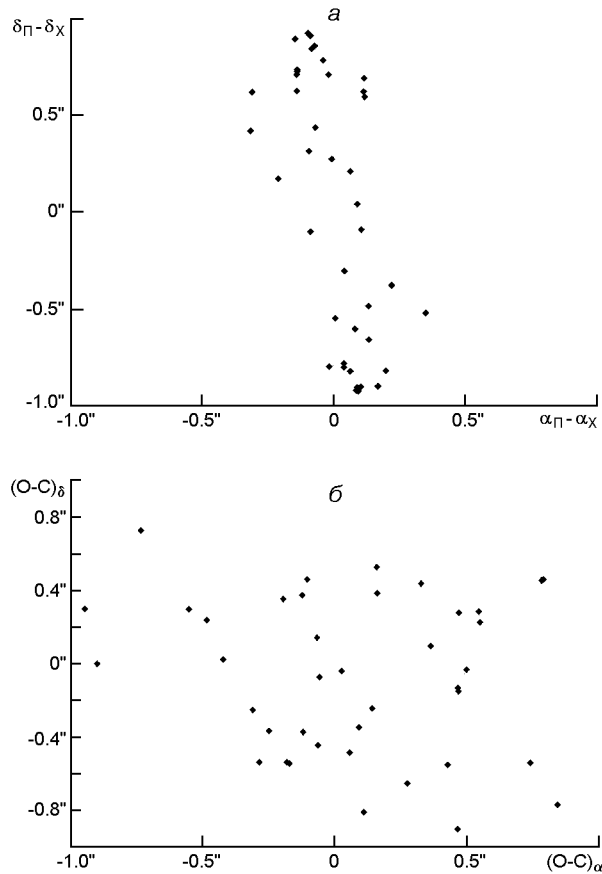
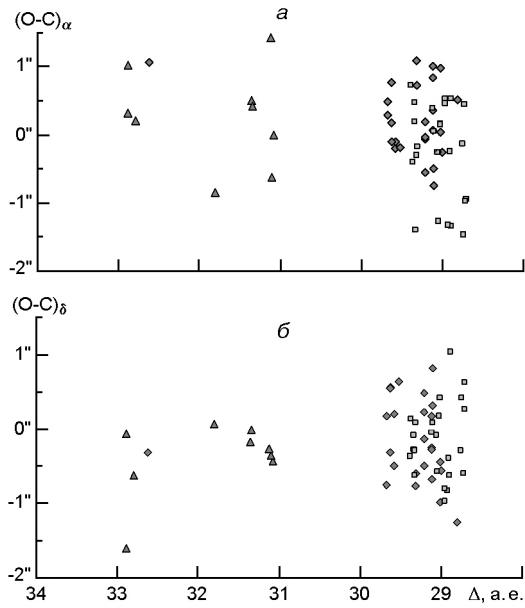


Рис. 8. Относительные разности координат положений Плутона и Харона на моменты наблюдений по эфемериде DE431 и распределение  $O - C$  в прямом восхождении и склонении

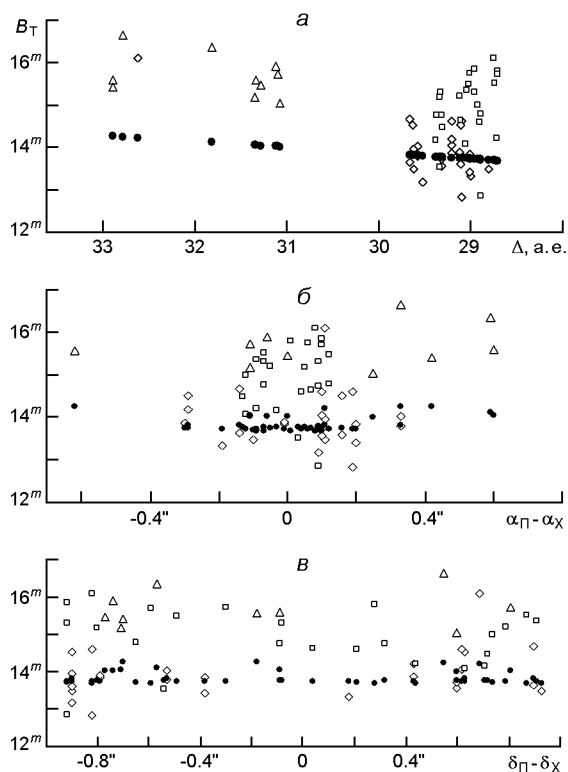


Рис. 9. Фотометрические оценки звездной величины Плутона в зависимости от геоцентрического расстояния планеты и относительных разностей координат Плутона и Харона (ромбики — ГАО НАН Украины, квадратик — АО КНУ, треугольники — НИИ НАО, точки — эфемеридные значения звездной величины Плутона)

воляют однозначно выявить наличие такого массивного спутника у Плутона, как Харон.

## ВЫВОДЫ

1. Вследствие объединения архивов и ресурсов трех украинских обсерваторий, участвующих в проекте УкрВО, собраны, оцифрованы и обработаны по единой методике все имеющиеся в базе данных фотографические наблюдения Плутона этих обсерваторий за 1961—1990 гг.

2. Оригинальная обработка цифровых изображений, разработанная на базе пакета MIDAS/ROMAFOT, успешно применена для анализа незвездных изображений на примере системы Плутона и определения его астрометрических и фотометрических характеристик.

3. В результате получен каталог 59 астрометрических положений и звездных величин  $V_T$  Плутона за 30-летний период наблюдений в трех украинских обсерваториях (в том числе впервые обработано 10 наблюдений НАО, 11 — АО КНУ, 3 — ГАО НАН Украины, 35 — переобработаны).

4. Средняя погрешность определения координат звезд каталога «Tycho-2» по оцифрованным изображениям пластинок пяти телескопов составляет 95 и 93 мсд по  $\alpha$  и  $\delta$  соответственно, что в несколько раз выше по сравнению с классическими определениями координат звезд на пластинках. Средняя погрешность определения звездной величины  $B_T$  составляет  $0.32^m$ . Как результат сравнения с эфемеридой JPL PLU43-DE431 получены средние значения  $O - C$  по всем положениям, составляющие 0.05 и  $-0.19$  сд, и их средние квадратичные ошибки, равные 0.68 сд и 0.52 сд по координатам  $\alpha$  и  $\delta$  соответственно.

5. Выполнен предварительный анализ результатов и сравнение полученных данных с данными других исследователей.

Работа была частично поддержана в рамках Целевой комплексной программы научных космических исследований НАН Украины (2012—2016 гг.)

1. Андрук В. М., Бутенко Г. З., Яценко А. И. Фотометрия пластинок, оцифрованных сканером MICROTEK SCANMAKER 9800XL TMA // Кинематика и физика небес. тел.—2010.—**26**, № 3.—С. 75—81.
2. Андрук В. М., Пакуляк Л. К., Їжакевич О. М. та ін. Астрометрія платівок ДША, оцифрованих двома типами сканерів. Розділення зображень зір двох експозицій // Вісник КНУ ім. Т. Шевченка. Сер. Астрономія.—2012.—**48**.—С. 11—13.
3. Бондаренко Ю. С., Медведев Ю. Д., Ясько П. П. Уточнение положений Плутона по наблюдениям 2005—2011 гг. // Изв. Глав. астрон. обсерватории в Пулкове.—2012.—**220**.—С. 171—178.
4. Вавилова И. Б., Пакуляк Л. К., Процюк Ю. И. Украинская виртуальная обсерватория (УкрВО). Цель, структура и задачи // Космічна наука і технологія.—2010.—**16**, № 5.—С. 62—70.
5. Вавилова И. Б., Пакуляк Л. К., Сергеева Т. П. и др. Украинская виртуальная обсерватория (УкрВО). Современное состояние и перспективы развития объединенного архива наблюдений // Космічна наука і технологія.—2011.—**17**, № 4.—С. 74—91.
6. 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.
7. Головня В., Андрук В., Яценко А. Астрометрія платівок ПША, оцифрованих сканером MICROTEK SCANMAKER 9800XL TMA // Журн. фіз. досліджень.—2010.—**14**, № 2.—С. 1—8.
8. Поляков Е. В., Федотова Л. А. Высокоточное сканирование для электронных астрономических коллекций // Тр. RCDL.—2006.—**1**.—A62.
9. Тельнюк-Адамчук В. В., Пасечник С. В. Результаты позиционных астрофотографических наблюдений Плутона // Вестн. Киев. ун-та. Сер. Астрономія.—1989.—**31**.—С. 82—83.
10. Acton C. Notes on the DE430 and DE431 planet and lunar ephemerides. — [http://naif.jpl.nasa.gov/pub/naif/generic\\_kernels/spk/planets/AAREADME\\_Planet\\_SPKs.txt](http://naif.jpl.nasa.gov/pub/naif/generic_kernels/spk/planets/AAREADME_Planet_SPKs.txt) [на 12.12.2013]
11. Assafin M., Camargo J., Vieira Martins R., et al. Precise predictions of stellar occultations by Pluto, Charon, Nix, and Hydra for 2008—2015 // Astron. and Astrophys.—2010.—**515**.—A32.—14 p.
12. Beauvalet L., Robert V., Lainey V., et al. ODIN: a new model and ephemeris for the Pluto system // Astron. and Astrophys.—2013.—**553**.—A14.—22 p.

13. *Steffl A. J., Mutchler M. J., Weaver H. A., et al.* New constraints on additional satellites of the Pluto system // *Astron. J.*—2006.—**132**, N 2.—P. 614—619.
14. *Carlsberg Meridian Catalogues.* Observations of positions of stars and planets, May 1984 to May 1998 including extinction and meteorological data. — La Palma, 1999.
15. *Folkner W., Williams J., Boggs D.* The planetary and lunar ephemeris DE 421 // *IPN Progress Report.*—2009.—P. 42—178.
16. *Iorio L.* Perspectives on effectively constraining the location of a massive trans-Plutonian object with the New Horizons spacecraft: a sensitivity analysis // *Celest. Mech. and Dynam. Astron.*—2013.—**116**, N 4.—P. 357—366.
17. *Khrutskaya E. V., De Cuyper J.-P., Kalinin S. I., et al.* Positions of Pluto extracted from digitized Pulkovo photographic plates taken in 1930—1960 // *arXiv:1310.7502 - 10/2013* — 8 p.
18. *MIDAS User Guide.* European Southern Observatory — Image Processing Group. — Garching, ESO, 1994. — Vol. A, B, C.
19. *Pitjeva E. V.* Updated IAA RAS planetary ephemerides-EPM2011 and their use in scientific research // *Solar System Res.*—2013.—**47**, N 5.—P. 386—402.
20. *Rapaport M., Teixeira R., Le Campion J. F., et al.* Astrometry of Pluto and Saturn with the CCD meridian instruments of Bordeaux and Valinhos // *Astron. and Astrophys.*—2002.—**383**.—P. 1054—1061.
21. *Hudec R.* Astronomical plate archives: Past, Present, Future // *Workshop: AstroPlate-2014 (Prague, March 18—21, 2014).*—[www.astroplate.cz](http://www.astroplate.cz)
22. *Rizvanov N., Nefedjev Ju.* Photographic observations of solar system bodies at the Engelhardt astronomical observatory // *Astron. and Astrophys.*—2005.—**444**, N 2.—P. 625—627.
23. *Ryl'kov V. P., Dement'eva A. A., Alksnis A., Straume J. I.* Photographic observations of Pluto 1991—1994 with the Baldone Schmidt telescope // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1996.—**118**.—P. 105—110.
24. *Ryl'kov V. P., Bronnikova N. M., Dement'eva A. A., Alksnis A. K.* Photographic positional observations of Pluto in 1991 // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies.*—1993.—**9**, N 4.—P. 21—27.
25. *Ryl'kov V. P., Vityazev V. V., Dement'eva A. A.* Pluto: Analysis of photographic positions obtained with Pulkovo Normal Astrograph in 1930—1992 // *Astron. and Astrophys. Trans.*—1995.—**6**.—P. 265—281.
26. *Shatokhina S. V.* Astrometric positions of the external planets and their satellites.—[www.mao.kiev.ua/ast/unp.php](http://www.mao.kiev.ua/ast/unp.php).
27. *Simon J.-L., Francou G., Fienga A., Manche H.* New analytical planetary theories VSOP2013 and TOP2013 // *Astron. and Astrophys.*—2013.—**557**.—A49.—12 p.
28. *Standish E. M.* Improved ephemerides of Pluto // *Icarus.*—1994.—**108**, N 2.—P. 180—185.
29. *Tholen D. J., Buie M. W., Grundy W. M., Elliott G. T.* Masses of Nix and Hydra // *Astron. J.*—2008.—**135**, N 3.—P. 777—784.
30. *Tsvetkova K., Tsvetkov M.* Catalogue of wide-field plate archives // *VizieR On-line Data Catalog: VI/126.* — Bulgarian Academy of Sciences, Institute of Astronomy, 2008.
31. *Vavilova I. B., Pakuliak L. K., Andruk V. M., et al.* UKRVO joint digitized archive and scientific prospects // *Baltic Astron.*—2012.—**21**, N 3.—P. 356—365.
32. *Yoshizawa M., Soma M., Suzuki S.* Positions of Pluto in 1994 observed with the Tokyo CCD Meridian Circle // *Astron. J.*—1995.—**110**.—P. 3050.

Статья поступила в редакцию 10.04.14