

ОЦИФРОВКА, ИЗМЕРЕНИЯ И КАЛИБРОВКА АСТРОНЕГАТИВОВ ПРИ ПОМОЩИ ЦИФРОВОЙ ФОТОКАМЕРЫ

Рощина Е.А., Измайлов И.С.

*Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория
РАН*

*Всероссийская астрометрическая конференция
«Пулково-2015», 21-25 сентября 2015 г.*

ПРОБЛЕМА

- 22000 фотопластинок (26" рефрактор, 11x16 см, $M=19.80$ "/мм) двойные звезды, планеты и спутники и т.д.

Измерения фотопластинок в Пулковской обсерватории

- «Аскорекорд» с визуальным наведением
- Автоматический измерительный комплекс «Фантазия»
- Планшетные сканеры

На начало 2012 г.:

**5000 пластинок с изображениями двойных звезд
никогда не измерялись**

ROB DIGITIZER

- 2008-2010, Брюссель, оцифровка пластинок на Rob Digitizer в сотрудничестве с Dr. J-P. De Cuiper (Е.В. Хруцкая, А.А. Бережной)

Manufacturer: AEROTECH (USA)

Positioning system: AEROTECH ABL3600
on granit plate 1.5 m x 1.2 m x 0.2 m

Optical block:

Schneider Xenoplan telecentric objective 1:1,
12 bit CMOS camera (BCi4),
size of field 1280x1024 px,
Size of pixel: 7x7 micron



ROB DIGITIZER

- 2008-2010, Брюссель, оцифровка пластинок на Rob Digitizer в сотрудничестве с Dr. J-P. De Cuiper (Е.В. Хруцкая, А.А. Бережной)

1) Шаблон:

фотопластинка (16 x 13 см)

200 круглых меток

размер **250 - 300** мкм



2) ок. 250 пластинок

Норм. астрограф

точность измерений - 15-20 mas (**0.3 мкм**)

точность редукции - 85-105 mas

ОБОРУДОВАНИЕ

«Jupiter 21 M»
(vintage Soviet lens)

камера Canon EOS 5D Mark II

21.1-мегаpixel
сенсор - **CMOS**
размер - **36 x 24 мм**
разрешение -
5616 x 3744
bpp - **42**
ISO **50 - 3200**

фокус **200 мм**
апертура **1:4.0 ÷ 1:22**
поле зрения **12°**
разрешение (центр/края)
40/30 линий/мм
резьба **M42x1**

~1200 mm

ВВ: камера, объектив, столик
смонтированы на жестком стенде
закрепленном на несущей стене

~1200 mm

стеклянный столик и пластинка
область **80x110 мм**

LCD монитор
(вне фокуса)

*Всероссийская астрометрическая конференция
«Пулково-2015», 21-25 сентября 2015 г.*

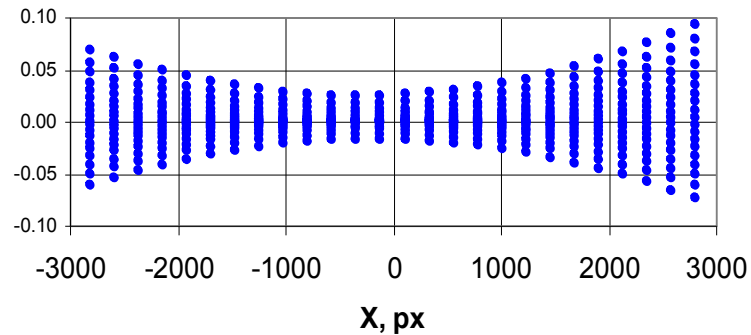
ИССЛЕДОВАНИЕ АБЕРРАЦИЙ

- Система координат шаблона, оцифрованного на ROB Digitizer, X, Y [мм] – стандартная
- Шаблон фотографируется камерой Canon, измеряется, система измеренных координат – x,y [px]
- Модель редукции $(x,y) \rightarrow (X,Y)$
 $n=3$
$$\left\{ \begin{array}{l} X = \sum_i^n \sum_j^i a_{ij} x^j y^{n-j} \\ Y = \sum_i^n \sum_j^i b_{ij} y^j x^{n-j} \end{array} \right.$$
- Сравнение координат меток шаблона (x,y) – (X,Y) , составление разностей координат
- Вычисление параметров редукции a_{ij}, b_{ij}

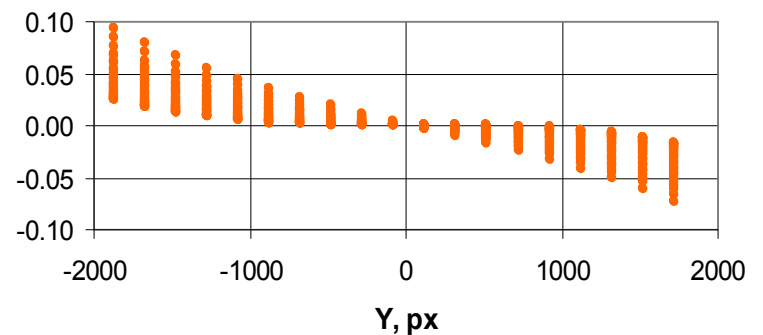
СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ОШИБКИ

зависимость систематических ошибок в разностях ΔX
по X и по Y

ΔX , mm

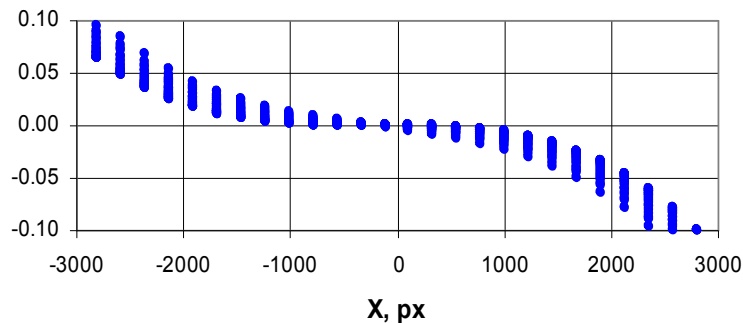


ΔX , mm

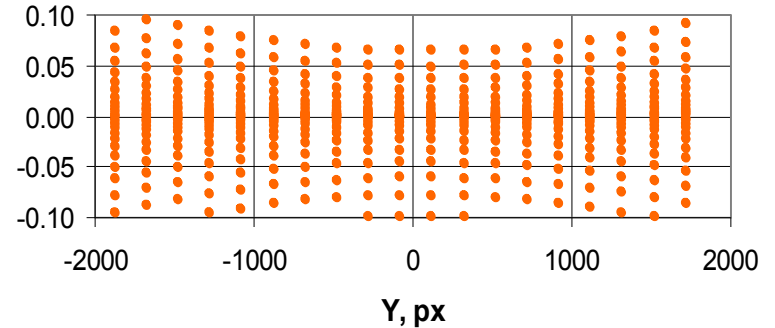


зависимость систематических ошибок в разностях ΔY
по X и по Y

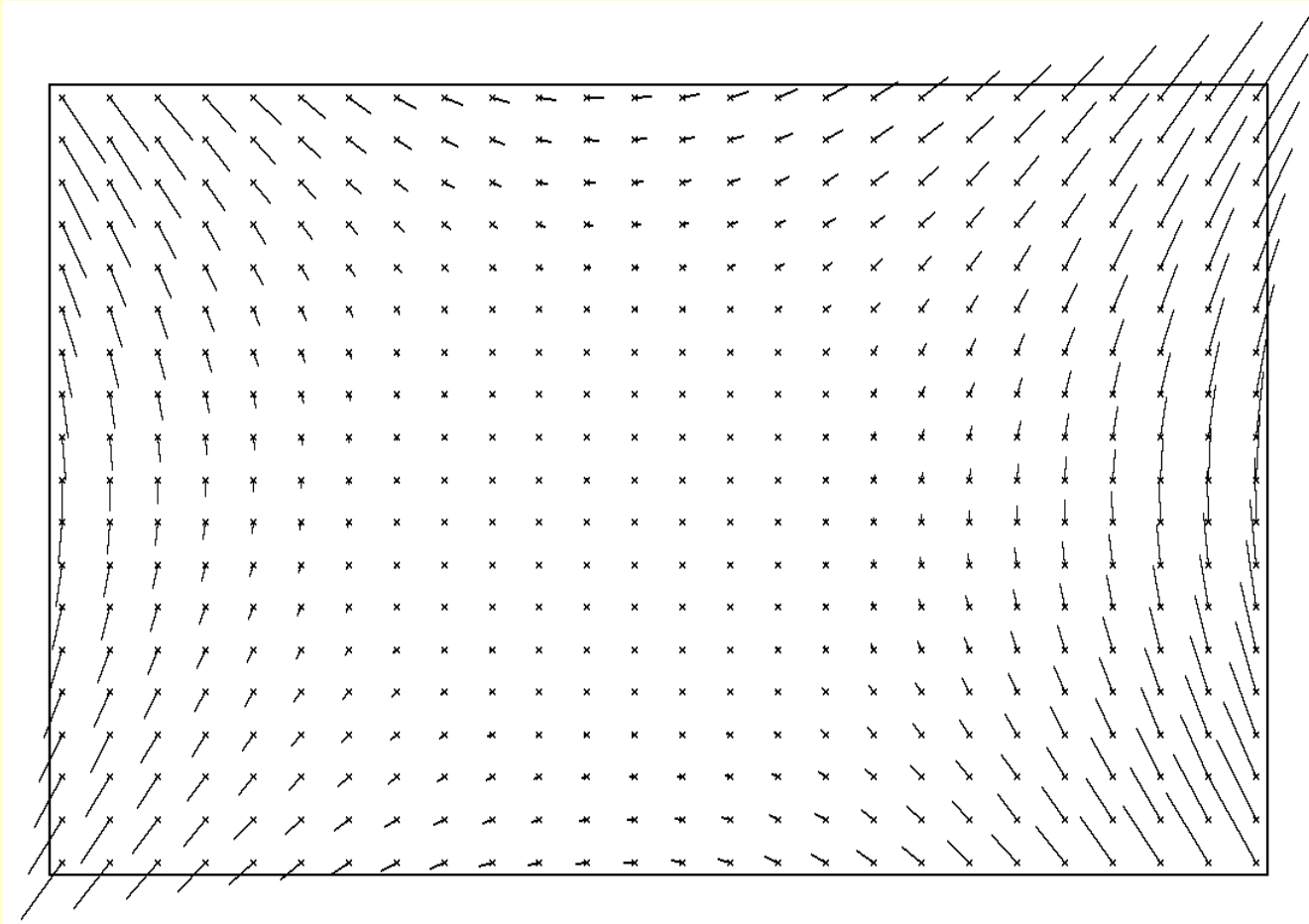
ΔY , mm



ΔY , mm



СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ОШИБКИ

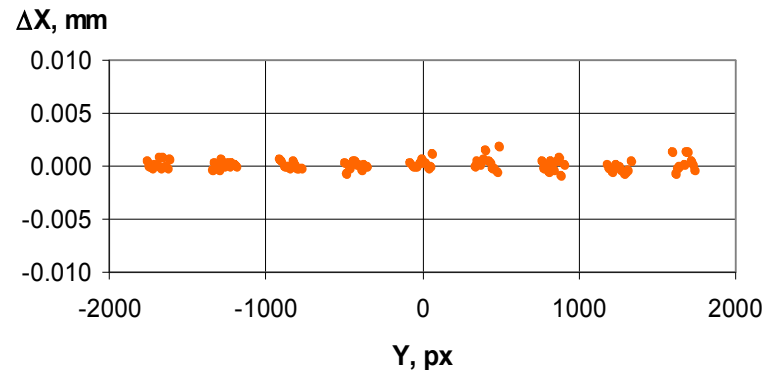
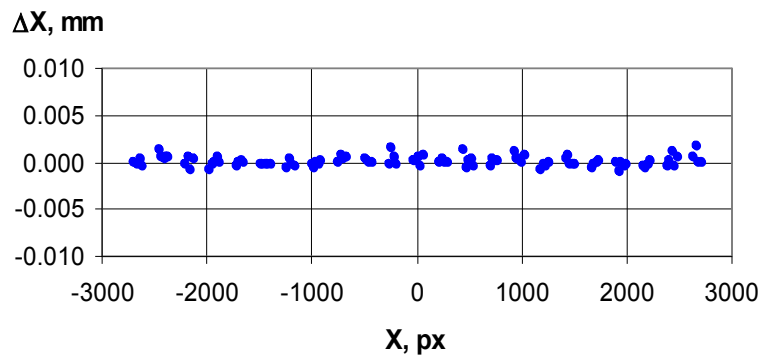


Векторное поле искажений оцифрованного изображения (3744x5616 px).
Наибольшая ошибка 0.0900 мм по X и 0.1000 мм по Y.

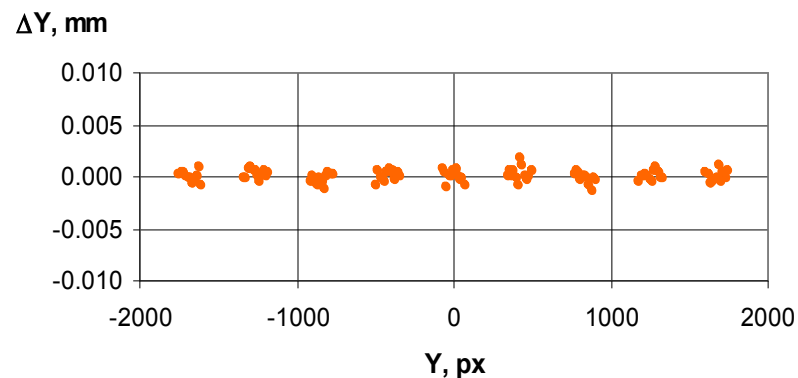
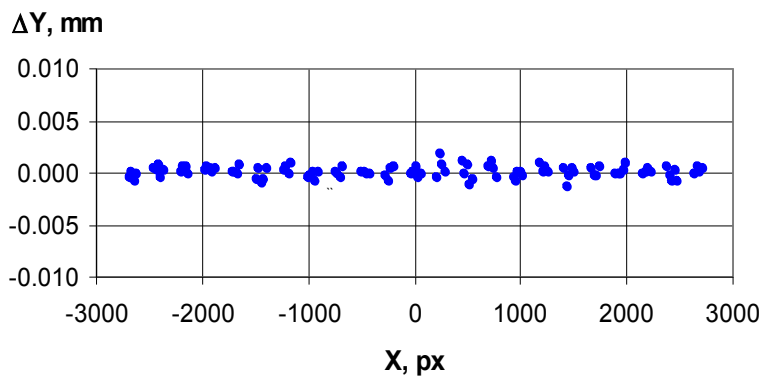
*Всероссийская астрометрическая конференция
«Пулково-2015», 21-25 сентября 2015 г.*

ОСТАТОЧНЫЕ РАЗНОСТИ

зависимость остаточных разностей ΔX
по X и по Y

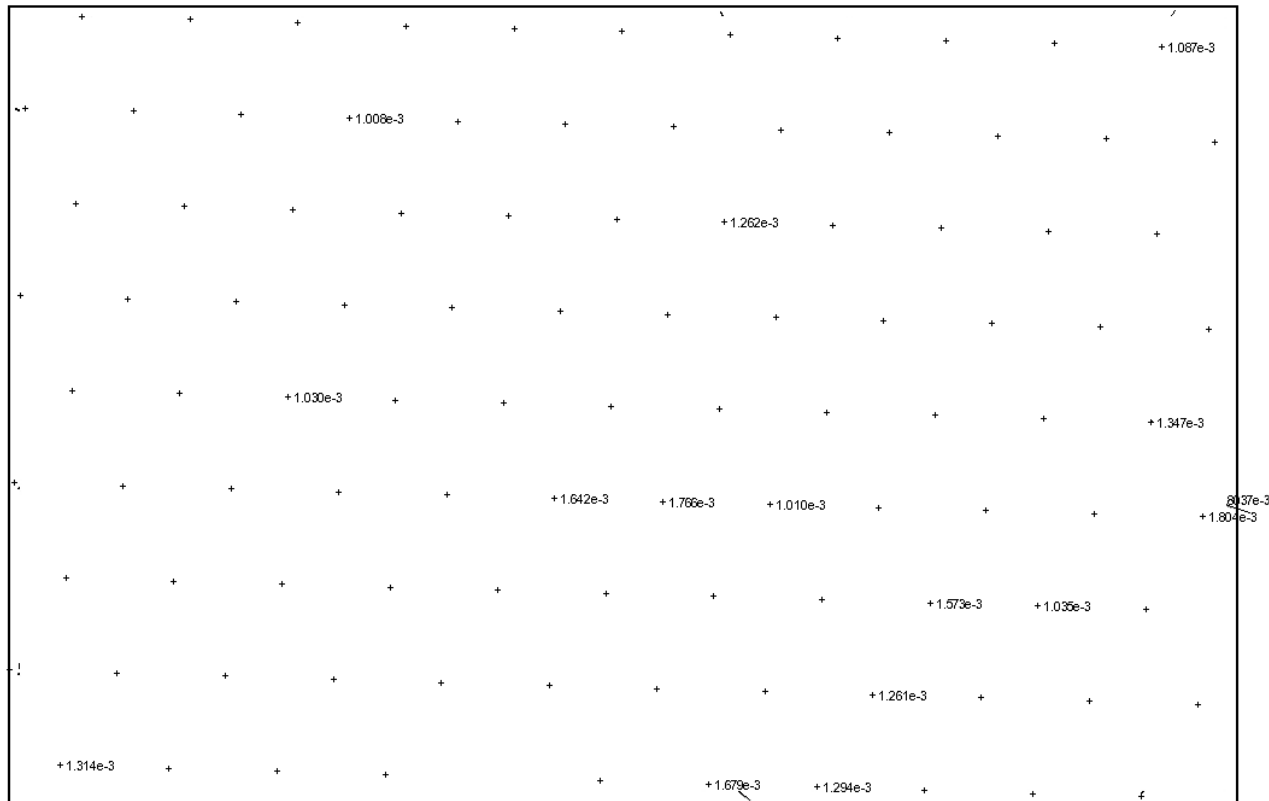


зависимость остаточных разностей ΔY
по X и по Y



ОСТАТОЧНЫЕ РАЗНОСТИ

Остаточные разности после исправления аберраций
Наибольшая разность **0.0017 мм** по X и **0.0017 мм** по Y
на краях изображения



$\sigma_{1X} = 0.56 \text{ мкм}$, $\sigma_{1Y} = 0.63 \text{ мкм}$, количество измерений - 30

*Всероссийская астрометрическая конференция
«Пулково-2015», 21-25 сентября 2015 г.*

ОЦИФРОВКА, ИЗМЕРЕНИЯ И РЕДУКЦИЯ

- Оцифровка шаблона
- Оцифровка серии фотопластинок
- Измерения (x, y [px]) - IZMCCD, профиль Моффата
(Измайлов, 2005; Измайлов и др., 2010).
- Вычисление параметров преобразования координат a_{ij} , b_{ij}

$$\begin{cases} X = \sum_i^n \sum_j^i a_{ij} x^j y^{n-j} \\ Y = \sum_i^n \sum_j^i b_{ij} y^j x^{n-j} \end{cases}$$

- Преобразование измеренных координат объектов на фотопластинках в стандартную систему X,Y [мм]

СТАБИЛЬНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ

Шаблон был оцифрован в нескольких положениях и измерен несколько раз. Сравнение результатов производилось линейным методом.

вид испытания	σ_x	σ_y	N
многократная оцифровка без сдвига	0.37	0.39	10
многократная оцифровка со сдвигом пластинки	0.49	0.50	10
многократная оцифровка с поворотом на 180°	0.73	0.88	10
многократная оцифровка с поворотом на 90°	0.63	0.63	10

N – число сравнений измерений, по которым было выполнено усреднение ошибок. σ_x , σ_y – ошибки единицы веса, мкм.

ТЕСТИРОВАНИЕ

Параллактическая серия для ADS 8002

- 55 фотопластинок (26"-рефрактор, $M = 19.80''/\text{mm}$).
- 5 опорных звезд в области 75x90 мм.
- 5 – 20 экспозиций на фотопластинке.
- 1 пикс оцифрованного изображения соответствует 21 мкм пластинки.

Предыдущие измерения

- "Askorecord"
- автоматический высокоточный комплекс "Фантазия"
- сканер Microtek Scan Maker i900 (по двум методикам)

Оптимальный режим оцифровки:

- Спектральный диапазон – белый фон
- Диафрагма – 8
- Выдержка – $\frac{1}{4}$, чувствительность – ISO 400
- Объектив – 300 mm «TAIR-3» vs 200mm «Jupiter 21 M»
- Режим "Live-view" с поднятым зеркалом
- Пауза перед съемкой
- Многократная пересъемка

*Всероссийская астрометрическая конференция
«Пулково-2015», 21-25 сентября 2015 г.*

СРАВНЕНИЕ ТОЧНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ

	N	mean σ	ADS 8002 A		ADS 8002 B	
			σ_x [мкм]	σ_y [мкм]	σ_x [мкм]	σ_y [мкм]
Фантазия	25	0.81	0.77	0.83	0.97	0.66
Askorecord	25	1.57	1.34	1.72	1.29	1.95
Фантазия	36	0.84	0.81	0.82	1.06	0.68
Сканер (1)	36	2.95	1.88	3.72	2.57	3.65
Фантазия	30	0.77	0.67	0.75	1.00	0.64
Сканер (2)	30	1.80	1.51	1.56	2.61	1.49
Фантазия	40	1.03	1.00	1.11	1.19	0.83
MDD	40	1.02	1.03	0.95	1.07	1.01

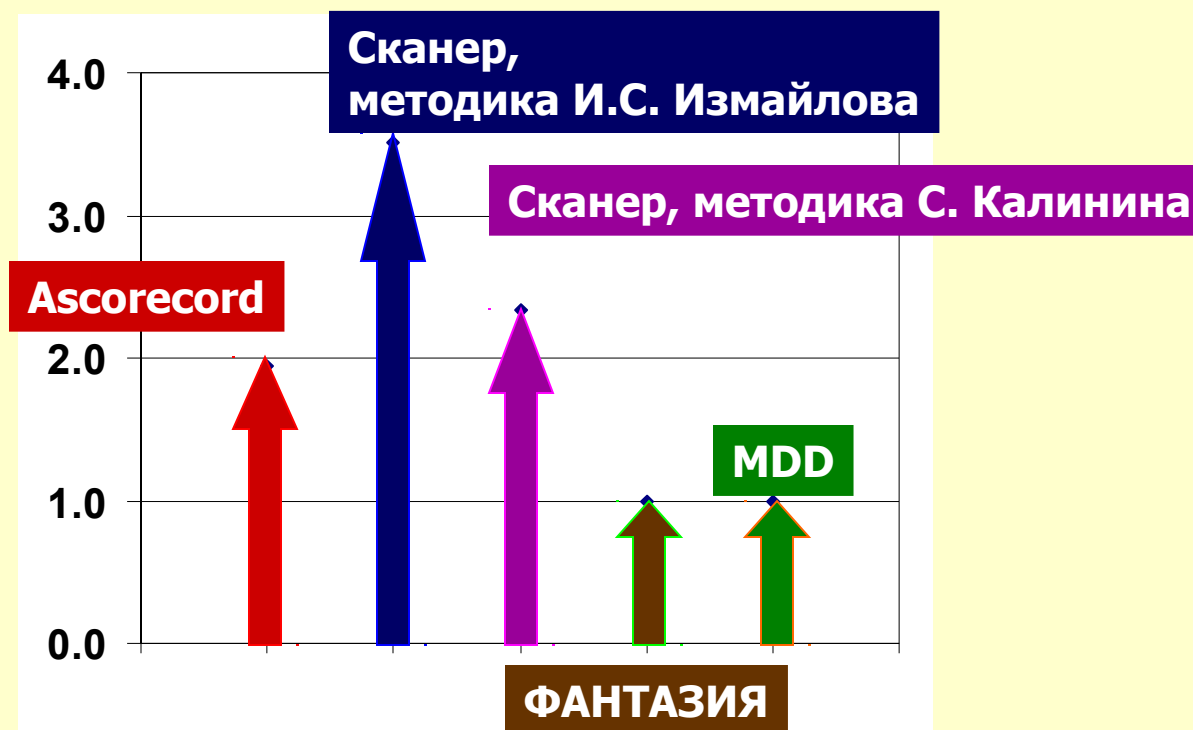
Таблица. Стандартные отклонения (мкм) для одной пластинки по X и Y для компонент A и B двойной звезды ADS 8002. N- число сравниваемых пластинок .

*Всероссийская астрометрическая конференция
«Пулково-2015», 21-25 сентября 2015 г.*

ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ ТОЧНОСТИ

Точность измерений ФАНТАЗИИ принята за эталон

«Askorecord»	1.94	«ФАНТАЗИЯ»	1.00
Сканер (методика И.С. Измайлова)	3.51	<u>MDD</u>	<u>0.99</u>
Сканер (методика С. Калинина)	2.33		



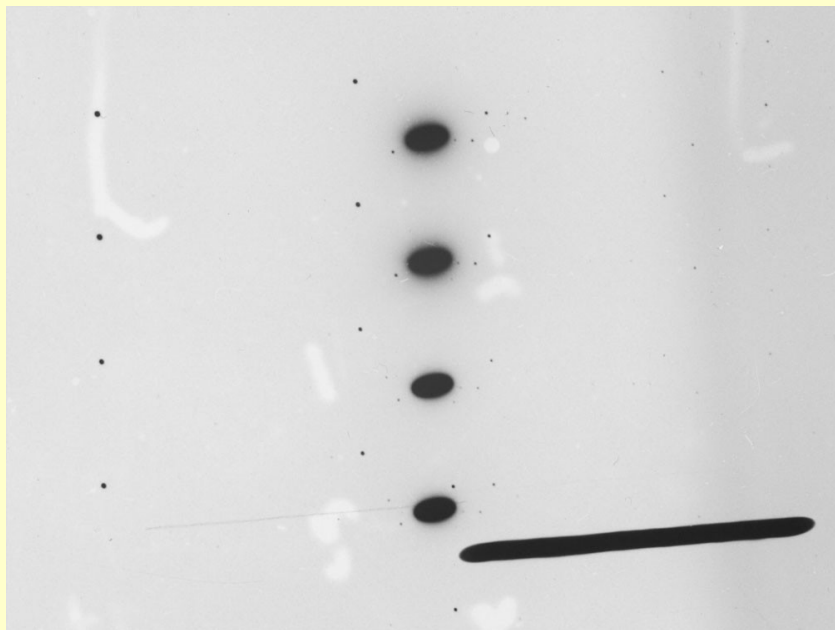
*Всероссийская астрометрическая конференция
«Пулково-2015», 21-25 сентября 2015 г.*

СПУТНИКИ САТУРНА

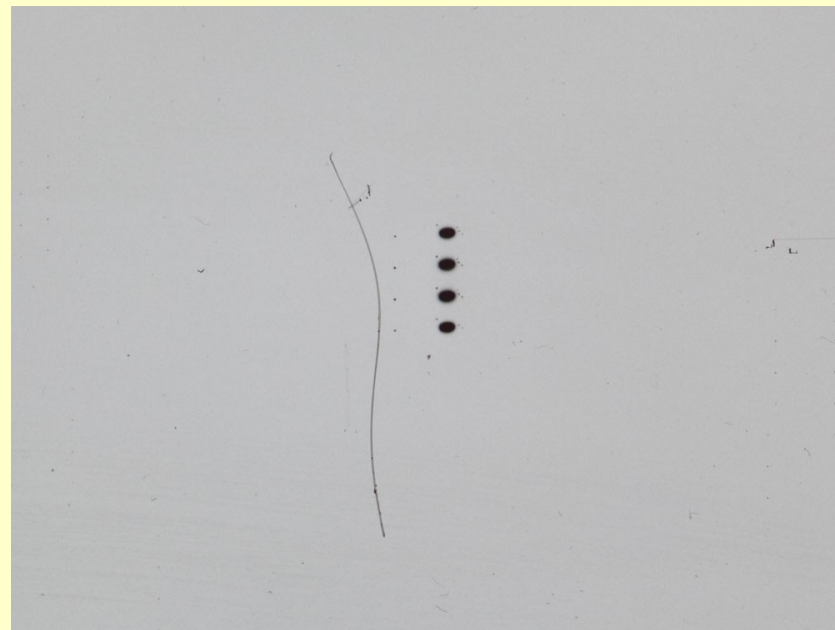
Наблюдательный материал: 150 пластинок, 1972-1974 г.г.
Нормальный астрограф и 26" рефрактор

Спутники: **S2 - S8**

Предыдущие измерения: ASKORECORD



пл. 6757
26"-рефрактор, 8.01.1974
 $M=19.80''/\text{мм}$



пл. 9853
Норм.астрограф, 5.10.1972
 $M=59''/\text{мм}$

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ НОВОЙ РЕДУКЦИИ

Телескоп	$\sigma_\alpha \cos \delta$ [arcsec]	σ_δ [arcsec]	N
----------	---	-----------------------------	---

MDD + TYCHO-2, UCAC3

26"-рефрактор	± 0.09	± 0.08	302
Норм. астрограф	± 0.16	± 0.19	109

ASKORECORD + AGK 3

26"-рефрактор	± 0.15	± 0.18	120
Норм. астрограф	± 0.21	± 0.19	63

Подробнее см. постер

Киселева Т.П. и др. “Повышение точности фотографических наблюдений 1972-1974 гг. системы Сатурна в новой редукции ...”

Всероссийская астрометрическая конференция

«Пулково-2015», 21-25 сентября 2015 г.

ВИЗУАЛЬНО-ДВОЙНЫЕ ЗВЕЗДЫ

2012 г. - более 9000 пл., 1957-2007 гг., 26"-рефрактор

из них хорошего и наилучшего качества - 6488 пластинок

Исследованы масштабы по X и Y:

зависимость от температуры

ход со временем

- > определены поправки для масштаба

взаимозависимость масштабов

$$h_{t^{\circ}\text{C}} = 0.0000797 \pm 0.0000084 \text{ ["/мм/гр.]}$$

$$h_T = 0.000086 \pm 0.000010 \text{ ["/мм/год]}$$

Исследованы невязки опорных звезд

зависимость от показателя цвета B-V

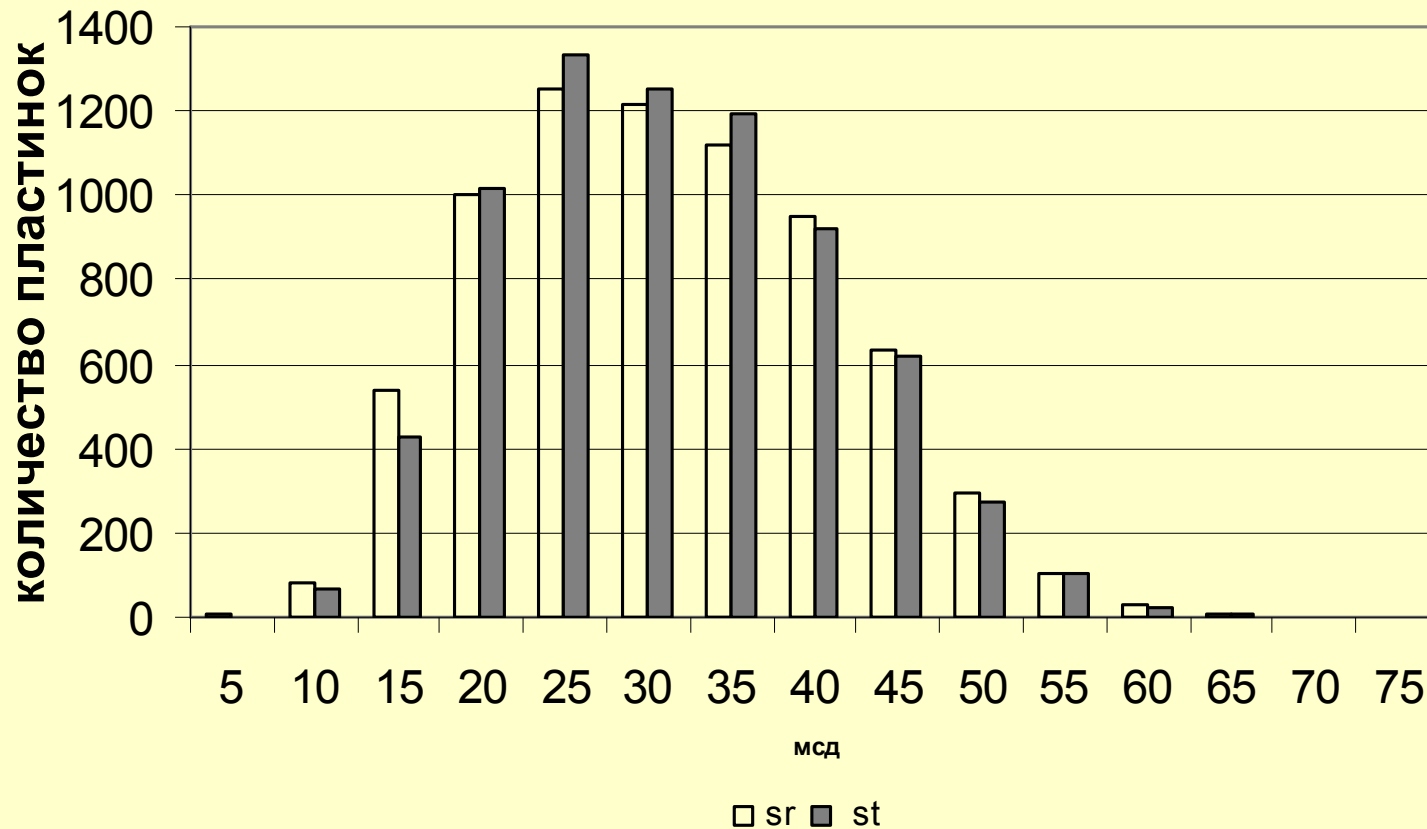
от зенитного расстояния за звезд с самым большим показателем цвета

от положения на пластинке - > систематических ошибок не выявлено

Выполнено сравнение с предыдущими измерениями

ADS 48, ADS 7251, ADS 11632 и ADS 14710 на «Фантазии»

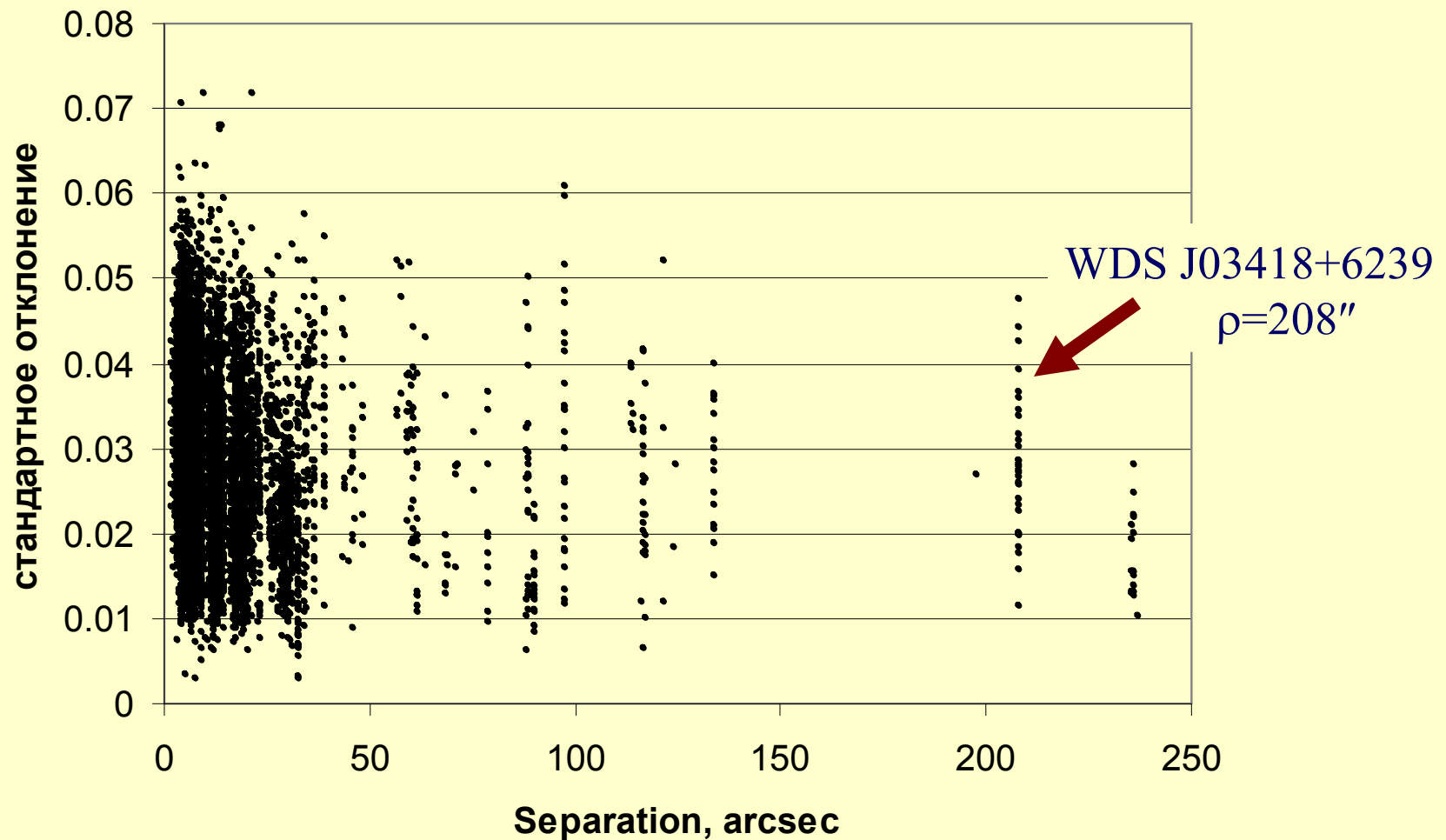
ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ



Распределение измерений относительных положений в паре звезд по точности в радиальном и трансверсальном направлениях, mas

*Всероссийская астрометрическая конференция
«Пулково-2015», 21-25 сентября 2015 г.*

ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ



Зависимость стандартного отклонения измерения одной экспозиции в радиальном направлении σ_r от углового расстояния ρ , arcsec

КАТАЛОГ ПОЛОЖЕНИЙ

358 пар звезд
7248 относительных положений
2129 среднегодовых положений

Ошибки одной экспозиции: σ_ρ и σ_τ : 2 – 70 mas, 28 mas в среднем

Ошибки среднего по пластинке: $\varepsilon_\rho = 10 \text{ mas}$ $\varepsilon_\theta = 0.07^\circ$

Ошибки среднегодовых положений : $\varepsilon_\rho = 8.7 \text{ mas}$ $\varepsilon_\theta = 0.05^\circ$

Каталог будет доступен в пулковской базе данных puldb.ru и в базе [CDS](#) после публикации в журнале

ПИСЬМА В АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ,
2015, том 41, №12, с. 1-14

*Всероссийская астрометрическая конференция
«Пулково-2015», 21-25 сентября 2015 г.*

ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ

Плюс :

- Скорость оцифровки – 2 пластинки в минуту;
- Нет искажений из-за неравномерности движения линейки сканера;
- Нет искажений связанных с мозаичностью изображения;
- Аберрации оцифрованного изображения привносятся объективом, постоянны в пределах одной серии и поддаются коррекции;
- В случае поломки камера легко заменяема;
- Стенд с держателем пластинки и камерой мобильный и может быть доставлен к стеклотекам;
- Низкая стоимость: камера – 2000 евро, объектив – бесплатный, компоненты стенда – около 10 000 руб (+ стоимость компьютера с двумя мониторами).

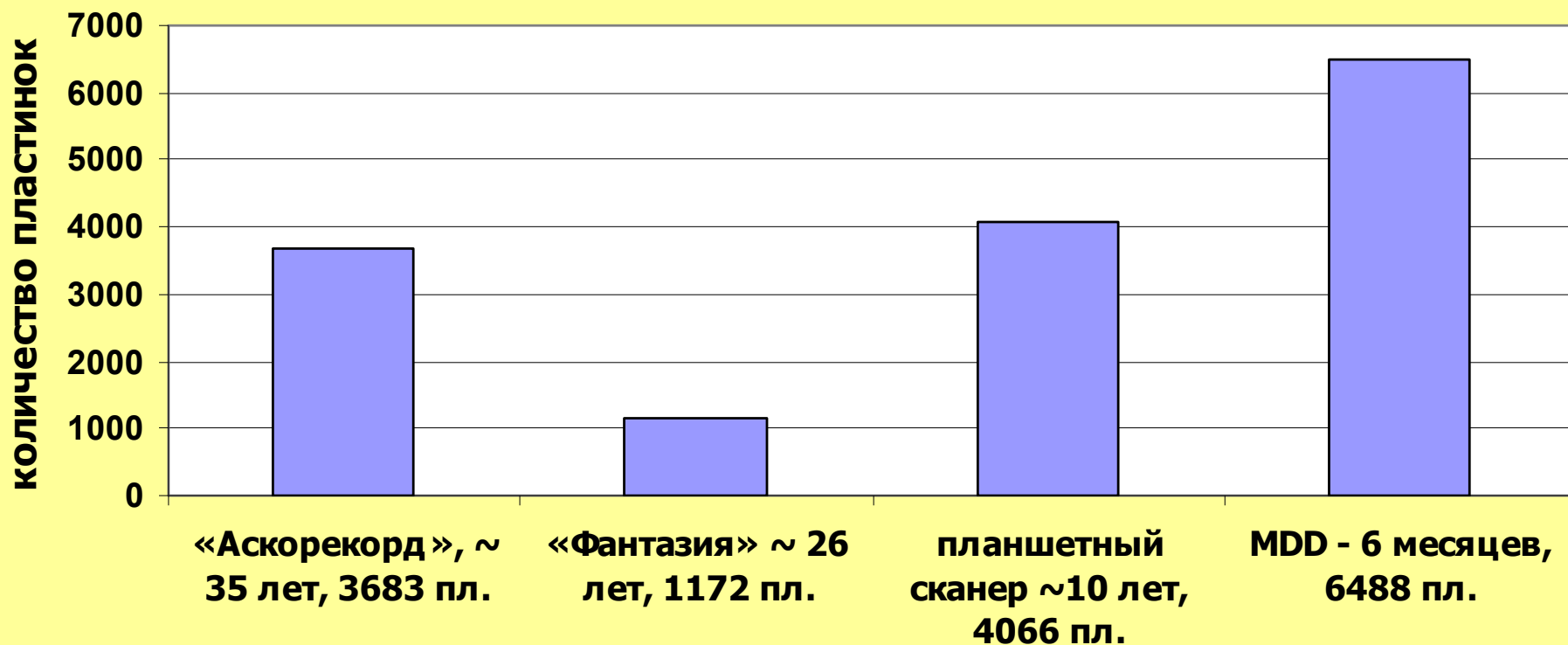
Минус:

Низкое разрешение. 1 пх оцифрованного изображения соответствует 21 мкм пластинки (но можно варьировать от ~ 15 до 30 мкм).

*Всероссийская астрометрическая конференция
«Пулково-2015», 21-25 сентября 2015 г.*

СРАВНЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Обработка наблюдений визуально-двойных звезд



ПЕРСПЕКТИВЫ

Hasselblad H5D-60 Body 30 тыс. евро

Число мегапикселей матрицы	60
Разрешение по X (пикселей)	8956
Разрешение по Y (пикселей)	6708
Физический размер матрицы	40.2 x 53.7 мм



Canon EOS 5D Mark II : область 7x11 см, 21 мкм/рх
-> 0.4 "/рх для 26 "-рефрактора (М 19.8 "/мм)
-> 1.24 "/рх для Норм. астрографа (М 59 "/мм)

Hasselblad: область 7x11 см, 10 мкм/рх
-> 0.2 "/рх для 26 "-рефрактора (М 19.8 "/мм)
-> 0.6 "/рх для Норм. астрографа (М 59 "/мм)

или область 13x16 (вся пластинка 26 "-рефрактора)
с разрешением 10 мкм/рх

*Всероссийская астрометрическая конференция
«Пулково-2015», 21-25 сентября 2015 г.*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оцифровка астронегативов среднеформатными камерами
пригодна для астрометрических целей

Применение новой методики дает значительное увеличение
точности измерений фотопластинок, снятых на длиннофокусных
инструментах

Авторы благодарны

д.ф.-м.н. Ю.А. Наговицыну, д.ф.-м.н. А.Г. Тлатову
за поддержку проекта,

а также выражают признательность Dr. J.-P. De Cuypere (Royal
Observatory of Belgium) за помощь в подготовке калибровочного
шаблона.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

*Всероссийская астрометрическая конференция
«Пулково-2015», 21-25 сентября 2015 г.*

Distortion of DAMIAN's lens

Partly overlapping imagets are taken from template with DAMIAN.
Size of imagets is 7x7 mm (field of lens's view).

About of 100 marks of template were placed on 2 or 4 imagets.

Calculation of differences for camera's coordinates for two imagets:

$$\Delta X [\text{mm}] = X_{\text{pos1}} - X_{\text{pos2}}$$

$$\Delta Y [\text{mm}] = Y_{\text{pos1}} - Y_{\text{pos2}}$$

Generation of equations system:

$$\Delta X [\text{mm}] = f(tp_i, X_1[\text{px}], Y_1[\text{px}]) - f(tp_i, X_2[\text{px}], Y_2[\text{px}])$$

$$\Delta Y [\text{mm}] = f(tp_i, X_1[\text{px}], Y_1[\text{px}]) - f(tp_i, X_2[\text{px}], Y_2[\text{px}])$$

tp_i – parameters of the transformation of coordinates,
obtained taking into account the distortion

X_1, Y_1 – coordinates of mark on 1-st imaget, px.

X_2, Y_2 – coordinates of the same mark on 2-nd imaget, px.

Solution of system by the method of least squares and determination the

parameters tp_i . $\sigma_{1x} = 0.15 \mu$, $\sigma_{1y} = 0.17 \mu$.

Correction of distortion

Code of function for coordinate transformation from pixels to mm:

```
void vdam(double x,    // pix
          double y,    // pix
          double* xmm, // mm
          double* ymm, // mm
          double XPOSITION, // from fits head
          double YPOSITION, // from fits head
          double ti1, // ! pixel coordinate of x distortion center.
          double ti2, // ! pixel coordinate of y distortion center.
          double ti3, // ! initial scale [mm/pixel] x-axis
          double ti4, // ! initial scale [mm/pixel] y-axis
          double tp1, // 1. scale X
          double tp2, // 2. rot. X
          double tp3, // 3. offset X not used
          double tp4, // 4. scale Y
          double tp5, // 5. rot. Y
          double tp6, // 6. offset Y not used
          double tp7, // 7. dist. Off. X
          double tp8, // 8. dist. Off. Y
          double tp9, // 9. distort.
          )
{
    x = x+1;
    y = y+1;
    y = 1025-y;
    x = (x - ti1) * ti3;
    y = (y - ti2) * ti4;
    double r2 = x*x + y*y;

    double dx = tp1*x + (tp2*y-tp7*(3.0*x*x+y*y)
                    - tp8*x*y*y + tp9*x*r2);

    double dy = tp4*y+tp5*x-tp7*x*y*y
                - tp8*(x*x+3.0*y*y) + tp9*y*r2;

    *xmm = 1281*ti3-dx +XPOSITION;

    *ymm =      +dy +YPOSITION;
}
```