

УДК 617.7:535.34

А.В.Крайский, Т.В.Миронова

Физический Институт им. П.Н.Лебедева РАН,  
119991, Москва, Ленинский пр., 53. E-mail: [tania@itep.ru](mailto:tania@itep.ru)

## **ДИСТОРСИОННЫЕ И ХРОМАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕКОТОРЫХ ФОТОГРАФИЧЕСКИХ КАМЕР И ОБЪЕКТИВОВ**

*Корреляционный метод использован для сравнения виртуального калибровочного объекта и его цифровых изображений, полученных с помощью исследуемых объективов. Определены матрицы дисторсии ряда фотоаппаратов и сменных объективов, а также характеристики хроматических искажений для них. Для абсолютного большинства смещение красного и синего изображений максимально в углах кадра и не превышает долей пикселя. Дисторсионные искажения большинства объективов с фиксированным фокусом очень малы, порядка 0,5%. У объективов с перестройкой фокуса и у фотоаппаратов со встроенными объективами искажения находятся в диапазоне 2% - 4,5%. Для фотоаппаратов Sony и объективов Tamron показана зависимость величины дисторсионного искажения от величины фокусного расстояния.*

*Измерения выполняются предельно простым способом, без использования прецизионных систем и стендов, съемка «с руки». Не делается никаких предварительных предположений о свойствах функции дисторсии (например, о радиальной симметрии). Мы получаем не полиномиальное приближение формы кривой дисторсии, а напрямую измеряем искажение в любой точке кадра.*

### **КАЛИБРОВКА КАМЕРЫ КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ МЕТОД, ДИСТОРСИЯ, ХРОМАТИЧЕСКАЯ АБЕРРАЦИЯ**

При использовании съемочной аппаратуры в качестве измерительной возникает проблема ее калибровки. Известны различные способы калибровки, в большинстве своем достаточно трудоемкие и требующие прецизионного оборудования. В работах [1, 2] авторами предложен простой способ определения геометрических искажений в оптической системе. Делается снимок известного случайного плоского бинарного калибровочного объекта. Снимок делается без закрепления фотоаппарата, «с руки». Корреляционным методом [3] находятся четыре пары точек соответствия на снимке и на калибровочном объекте, что дает восемь необходимых коэффициентов для исключения проективных искажений (наклон оптической оси, масштаб, поворот, сдвиг). После этого путем корреляционной обработки можно получить величину и ориентацию смещения любой малой области снимка относительно соответствующей области калибровочного объекта. При обработке скользящим окном можно получить значения смещений в каждой точке снимка, чтобы затем использовать эту матрицу для компенсации искажений снимков, полученных с помощью данной оптической системы. Следует отметить, что такой метод дает большую точность измерения смещения малой области, до 0,03 пикселя [3]. Такая точность достигается посредством построения конической поверхности по данным измерения величины функции корреляции в окрестности максимума. Координаты вершины этого конуса дают положение максимума корреляционной функции с субпиксельной точностью.

Отметим также, что мы напрямую измеряем искажение в любой точке кадра, а не получаем полиномиальное приближение формы кривой дисторсии, также не делается никаких предварительных предположений о свойствах функции дисторсии.

С помощью похожей процедуры, путем корреляционной обработки пар областей изображения из разных цветовых каналов можно получить величину расхождения цветов, то есть оценить степень хроматических искажений по площади кадра.

Отметим, что в данной работе исследуются только дисторсионные искажения изображения, когда линейное увеличение изменяется по полю кадра. Резкость и другие возможные параметры оценки изображения, связанные с остальными aberrациями (сферическая, астигматизм, кривизна поля и кома), которые проявляются в виде увеличения пятна рассеяния, но не влияют на его положение в кадре, мы не рассматриваем.

На рис. 1 показан типичный вид матрицы искажений. Данные рассчитаны для фотоаппарата Canon Power Shot A570 при размере кадра 1280x960 пикселей. По горизонтальным осям отложены условные координаты по сторонам кадра. По вертикальной оси – величина искажения в пикселях. В колонке а) – в) приведены данные, полученные в случае, когда реперные точки для исключения проективных искажений выбраны в углах кадра.

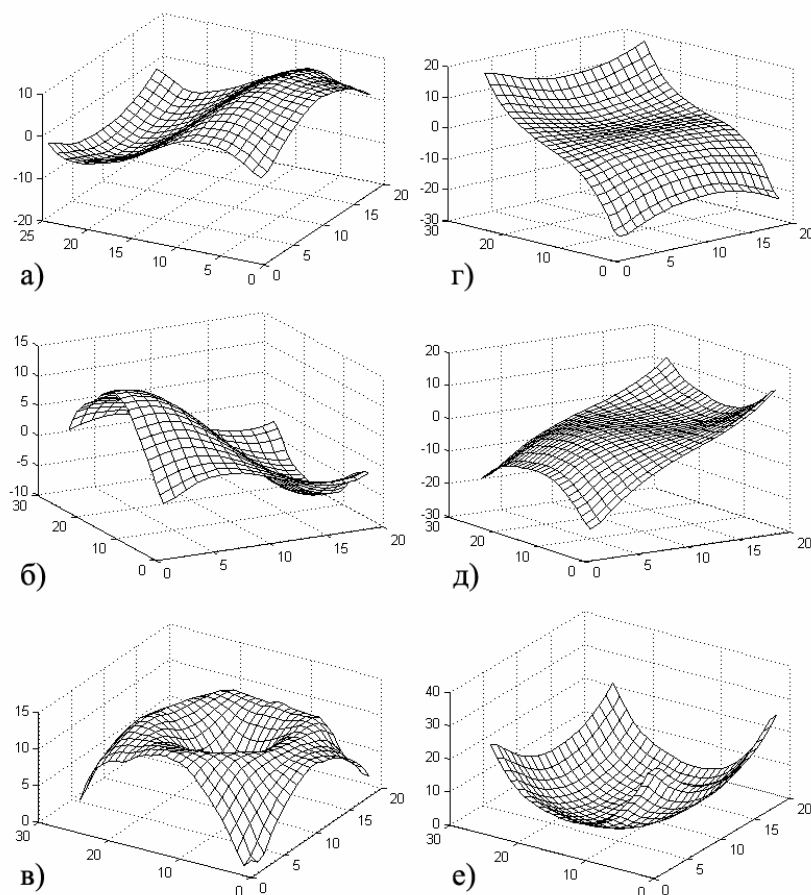


Рис. 1. Типичный вид матрицы искажений. Данные рассчитаны для фотоаппарата Canon Power Shot A570 при размере кадра 1280x960 пикселей. Горизонтальные оси - условные координаты вдоль сторон кадра. Вертикальная ось – величина искажения в пикселях. Колонка а) – в) – данные без восстановления масштаба. Колонка г) – е) – данные после восстановления масштаба. а) и г) – горизонтальная составляющая матрицы, б) и д) – вертикальная составляющая, в) и е) – абсолютные значения

После такого преобразования мы получаем матрицу дисторсионного искажения, достаточную для исправления снимка. Истинный масштаб снимка при этом не восстанавливается, и получается, что значения дисторсионных искажений минимальны в углах кадра, там, где были выбраны реперные точки, а также в области, близкой к центру

кадра. Положение центрального минимума искажений соответствует положению центра дисторсии. Мы исследовали около десятка цифровых фотоаппаратов и около десятка сменных объективов, новых и старых. У подавляющего большинства фотоаппаратов отклонение центра дисторсии от центра кадра не превышает 5 – 6 процентов от размера матрицы (50 пикселей при размере кадра 1280×960). При величинах дисторсии 0,5% и ниже, как, например, у объективов Таир, Индустар, Юпитер центр не определялся. У одного из исследованных фотоаппаратов, Olympus m1030SW центр дисторсии смещен от центра кадра на четверть размера матрицы. Зная центр, можно получить значения радиальной и тангенциальной компонент дисторсионных искажений. Тангенциальная компонента исчезающе мала практически у всех фотоаппаратов. Максимальное ее значение (порядка 0,15% при радиальной компоненте 2,3 %) встретилось нам в фотоаппарате Sony F717. На рис. 1 а) и б) показаны горизонтальная и вертикальная компоненты матрицы искажений, в) – абсолютная величина искажения по кадру. В колонке г) – е) приведены данные после восстановления масштаба. Масштаб восстанавливается при естественном предположении, что вблизи центра дисторсии искажения минимальны.

Видно, что в центральной части кадра искажения минимальны, сильнее всего дисторсия сказывается в угловых областях. Для обычных цифровых фотоаппаратов среднего класса максимальная величина смещения положения точек изображения относительно идеального составляет десятки пикселей, до трех процентов от линейного размера изображения.

Мы исследовали ряд цифровых фотоаппаратов различных производителей. Фотографировался специально отпечатанный плоский калибровочный объект. Объект имел случайную бинарную структуру на квадратной сетке. Вероятность заполнения 0,5. Величина элемента структуры и соотношение фокусного расстояния камеры и расстояния от камеры до объекта выбирались так, чтобы линейный размер изображения элемента был не меньше трех пикселей приемной матрицы фотоаппарата. Съемка проводилась «с руки», оптическая ось камеры была приблизительно перпендикулярна плоскости объекта. Надо отметить, что допустимы значительные отклонения от перпендикулярности, до 15 – 20 градусов. Основное условие – это чтобы в углах кадра качество изображения калибровочного объекта было достаточным для определения корреляционной функции. При усреднении по десяти измерениям для максимальной величины смещения без восстановления масштаба величина стандартного отклонения изменяется от 0,2 до 0,5 пикселей. Стандартное отклонение для смещений с учетом масштаба колеблется от 1 до 3 пикселей. При определении центра дисторсии стандартное отклонение достигает 6 пикселей. Для различных фотоаппаратов для разных значений фокусных расстояний получены матрицы сдвига. На рис.2 показаны центральные горизонтальные сечения матриц смещений для некоторых марок цифровых фотоаппаратов (для минимального фокусного расстояния и стандартизированной ширины кадра 1280 пикселей). По оси абсцисс – номера пикселей приемной матрицы по центральной линии, от левого края кадра до правого, по оси ординат – величина горизонтальной составляющей матрицы смещений. Видно, что, хотя по порядку величины смещения в разных фотоаппаратах похожи, некоторые из моделей имеют свои особенности. Например, у фотоаппарата Lumix FZ18 кривая дисторсии имеет два перегиба вне области центра, а у фотоаппарата Olympus 1030SW искажения в правой и левой половинах кадра сильно отличаются из-за значительного смещения центра дисторсии относительно центра кадра.

На врезке показаны центральные горизонтальные сечения матриц смещений для фотоаппарата Sony F717 при различных фокусных расстояниях: кривая 1 соответствует минимальному фокусу – 9,7 мм, 2 – 11,1 мм, 3 – 12,7 мм, 4 – 14,9 мм, 5 – 18,8 мм. Кривая 6 отвечает максимальному оптическому увеличению, фокусное расстояние 48,5 мм. При изменении фокусного расстояния от минимального до 15 мм дисторсия падает до нуля, и при дальнейшем увеличении фокуса компоненты матрицы сдвига меняют знак.

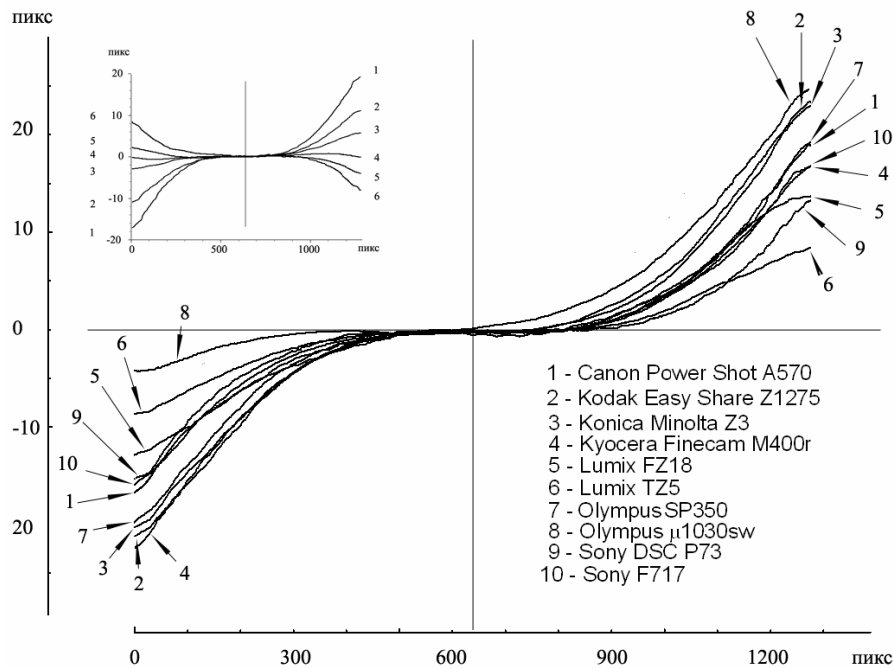


Рис. 2. Центральные горизонтальные сечения матриц смещений (минимальное фокусное расстояние, ширина кадра 1280 пикселей). Ось  $x$  – координата вдоль кадра, ось  $y$  – величина горизонтальной составляющей матрицы смещений

На врезке: центральные горизонтальные сечения матриц смещений для фотоаппарата Sony F717 при различных фокусных расстояниях: 1 – 9,7 мм, 2 – 11,1 мм, 3 – 12,7 мм, 4 – 14,9 мм, 5 – 18,8 мм, 6 – 48,5 мм

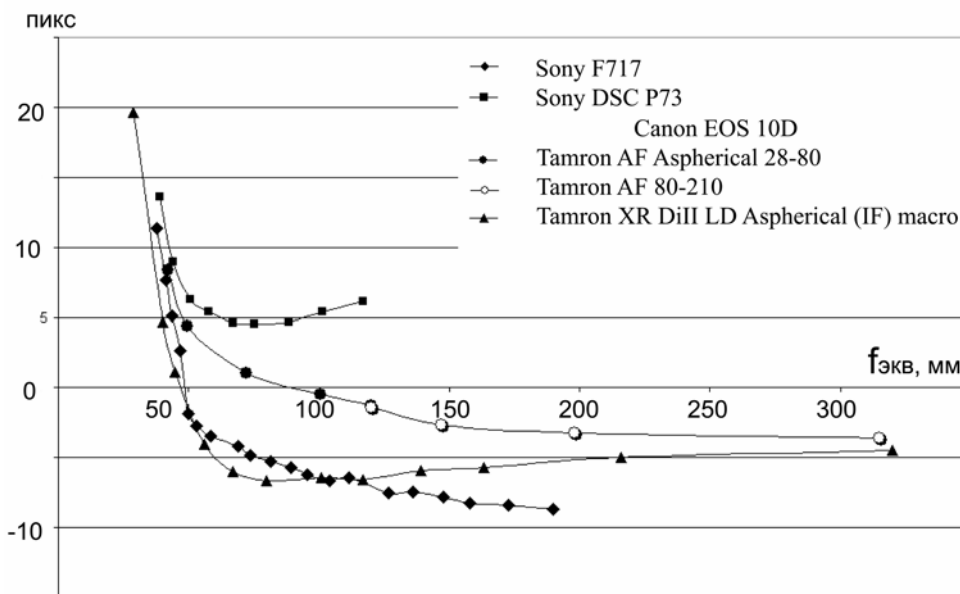


Рис. 3. Кривые зависимости дисторсионных искажений от фокусного расстояния объектива. Абсцисса – эквивалентные фокусные расстояния объективов, ордината – максимальные искажения в пикселях (ширина кадра 1280 пикселей)

На рис. 3 для двух фотоаппаратов Sony и трех объективов Tamron с аппаратом Canon EOS 10D приведены кривые зависимости максимальной величины искажения от фокусного расстояния объектива. По горизонтальной оси отложены эквивалентные фокусные расстояния объективов, по вертикальной оси – максимальные искажения в пикселях без учета масштаба. Размер матрицы аппарата Canon EOS 10D  $22,7 \times 15,1$  мм, так что эквивалентные фокусные расстояния для объективов Tamron получаются умножением

истинных фокусных расстояний на кроп-фактор 1,58. Для возможности сравнения все фокусные расстояния были взяты в пересчете для 35-мм камеры. Фотоаппарат Sony DSC P73: ПЗС матрица 1/2,7", фокусное расстояние объектива 6,0 – 18,0 мм, эквивалентно 39 – 117 мм для камер 35 мм, фотоаппарат Sony F717: ПЗС 2/3", фокусное расстояние 9,7 – 48,5 мм, 38 – 190 мм в эквиваленте для 35мм.

Видно, что при увеличении фокусного расстояния искажения резко уменьшаются, и для большинства объективов дисторсия уменьшается до нуля, а затем из бочкообразной становится подушкообразной, что на графике соответствует отрицательным значениям искажений.

По описанной выше схеме мы посмотрели геометрические искажения для ряда сменных объективов, в основном советского производства с использованием цифровой камеры Canon EOS 10D. Большинство из них имеют фиксированное фокусное расстояние (ФФР). На диаграмме (рис.4) для некоторых фотоаппаратов и объективов приведены максимальные значения искажений (при минимальном фокусном расстоянии для перестраиваемых объективов). Белые линии соответствуют величинам искажений при приведении снимка к калибровочному объекту по углам. Черные линии показывают максимальную величину искажения после восстановления масштаба. Видно, что у объективов с ФФР искажения очень малы (0,25% – 0,6%), кроме широкоугольного объектива Эра 6М (1,9%). У объективов с перестройкой фокуса (ПФ) и у фотоаппаратов со встроенными объективами (также с ПФ) искажения находятся в диапазоне 2% – 4,5% (кроме объектива Гранит 11м, у которого искажения крайне малы по сравнению с другими объективами с ПФ – 0,6%). Следует отметить, что для сменных объективов, предназначенных для работы с пленочными фотоаппаратами, штатный размер кадра в полтора раза больше матрицы фотоаппарата Canon EOS 10D, с которым проводились измерения.

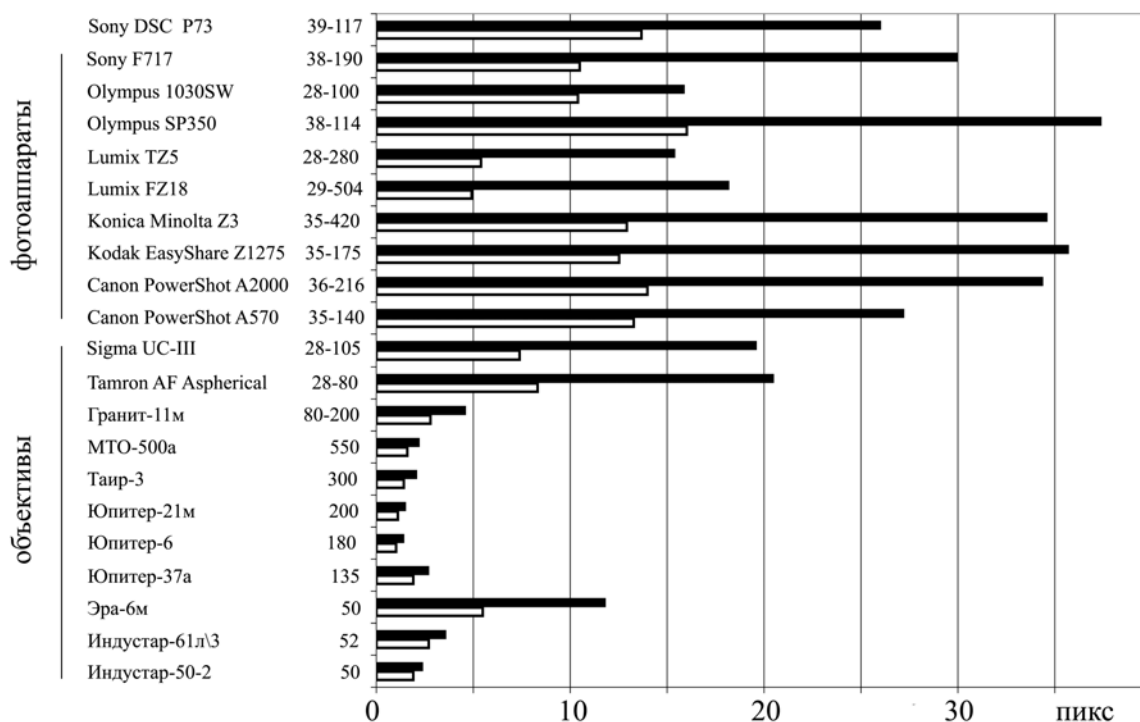


Рис.4. Максимальные значения искажений (при минимальном фокусном расстоянии для объективов с ПФ). Белые линии – по данным без учета масштаба. Черные линии - после восстановления масштаба. Ширина кадра 1280 пикселей. Числа показывают диапазон фокусных расстояний, для фотоаппаратов – эквивалентные, для объективов – по паспорту

Чтобы использовать матрицу искажений для исправления снимков, полученных с помощью данной оптической системы, нужно сдвинуть точки изображения в соответствии с рассчитанными значениями искажения в данной точке. Если объектив с переменным фокусным расстоянием, то исправлять искажения снимков нужно с помощью матрицы, полученной при том же фокусном расстоянии, с которым сделан снимок.

Мы провели сравнение качества исправления снимков при использовании нашего метода с результатами, полученными с помощью программы Photoshop (версия CS4). Сравнение проводилось по величине остаточных искажений снимка калибровочного объекта после исправления дисторсии. В Photoshop'e никакими ухищрениями не удалось достичь остаточных искажений меньше 3 – 5 пикселей. Корреляционный метод дает величину остаточных искажений в пределах одного пикселя.

С помощью корреляционного метода можно определять не только дисторсионные, но и хроматические искажения изображений. Для этого для окрестности каждой точки нужно найти корреляцию между разными цветовыми каналами изображения. В данной работе мы приводим только данные по измерению рассогласования красного и синего (как наиболее далеко отстоящих по спектру) каналов изображения черно-белого объекта, получаемого в цифровом фотоаппарате. Мы не выясняли, проводилась ли программная корректировка хроматизма в процессе обработки изображения процессорами фотоаппаратов. Также не проводился анализ конкретного вида хроматических aberrаций (хроматизм положения, хроматизм увеличения, хроматические разности aberrаций).

На рис.5 показаны матрицы цветовых искажений (абсолютные значения расхождения красного и синего каналов) при минимальном фокусном расстоянии и для полного размера кадра. Рис. 5а и 5б – типичные формы поверхности искажения, 5а – для объектива Эра 6М с фотоаппаратом Canon EOS 10D и 5б – для фотоаппарата Sony DSC P73. Величина расхождения порядка долей пикселя. На рис.5в приведены данные для фотоаппарата Olympus SP350. Возможно, нам попал неудачный экземпляр, но расхождение в положении синей и красной компонент изображения составило в одном из углов кадра больше трех пикселей.

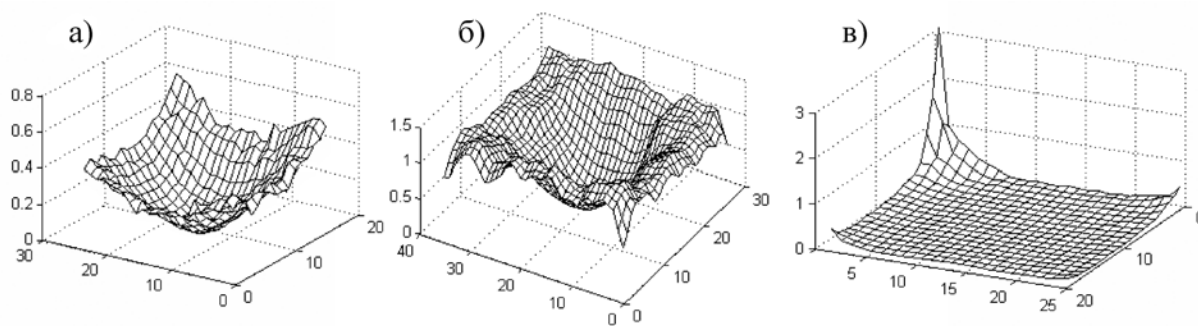


Рис. 5. Матрицы цветовых искажений: а) – объектив Эра 6М с фотоаппаратом Canon EOS 10D (размер кадра 2048x1360 пикс), б) – Sony DSC P73 (размер кадра 2304x1728 пикс), в) – Olympus SP350 (размер кадра 3264x2448 пикс). Горизонтальные оси – условные координаты вдоль сторон кадра, вертикальные оси – искажения в пикселях

На рис. 6 приведены данные о рассогласовании цветовых каналов для некоторых фотоаппаратов и объективов. Приведены максимальные значения по полю зрения при максимально возможных для каждого аппарата размерах кадра (не приведенных к единой ширине 1280 пикселей, как на рис. 1 – 4). Для фотоаппаратов и объективов с ПФ взято минимальное фокусное расстояние. Более половины исследованных фотоаппаратов и объективов показывают рассогласование цветовых каналов не более 0,5 пикселя, а у четверти эта величина превышает 1 пиксель. Стандартное отклонение варьируется от 0,02 до 0,08 пикселей для разных серий измерений. Измерять величину расхождения каналов в пикселях (рис. 6, слева) имеет смысл с точки зрения оценки качества цифрового (пиксельного) изображения. Что же касается величины расхождения в инвариантных

единицах, которая относится скорее к характеристикам объектива, то, поскольку размеры пикселя в рассмотренных фотоаппаратах различны (от 1,7 мк у Canon Powershot 2000 и Olympus 1030SW до 7,4 мк Canon EOS 10D), соотношение характеристик объективов становится несколько другим. Величины расхождения каналов в микронах показаны на рис.6 справа. У подавляющего большинства фотоаппаратов максимальное расхождение цветов не превышает двух микрон.

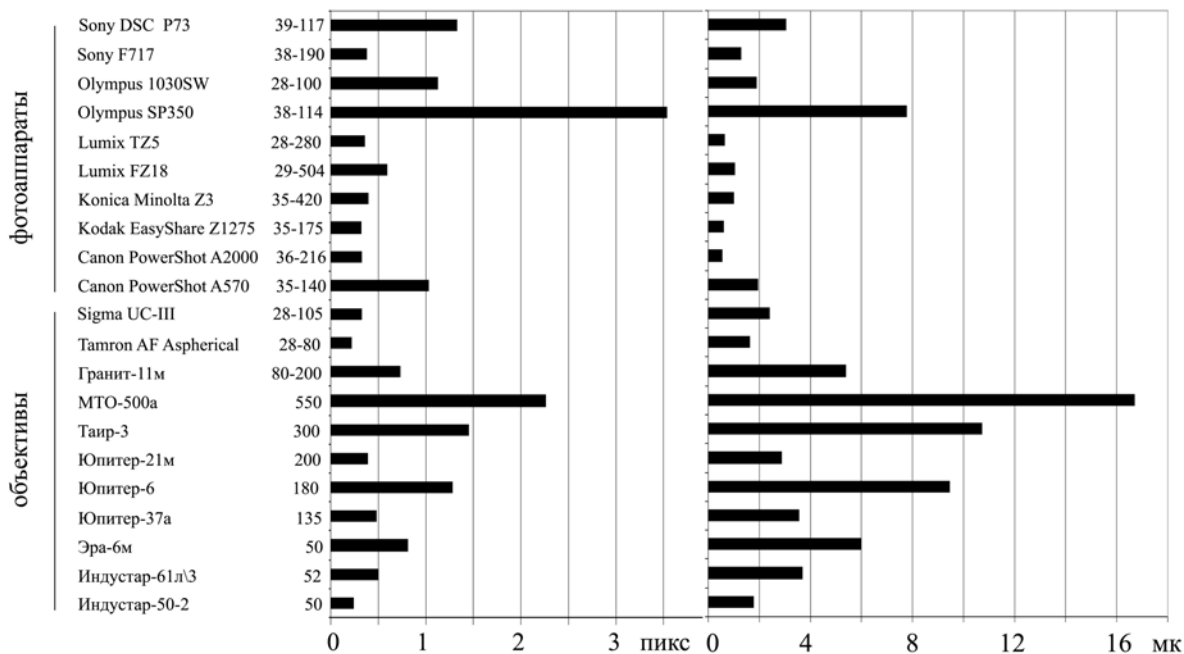


Рис.6. Максимальные абсолютные значения расхождения красного и синего каналов, слева – в пикселях, справа – в микронах. Минимальное фокусное расстояние, максимальный размер кадра

Таким образом, к основным результатам работы относятся следующие моменты. Корреляционный метод применен для выяснения степени геометрических искажений снимков. Калибровка выполняется предельно простым способом, без использования прецизионных измерительных систем и стендов, съемка «с руки». Не делается никаких предварительных предположений о свойствах функции дисторсии (например, о радиальной симметрии). Мы получаем не полиномиальное приближение формы кривой дисторсии, а напрямую измеряем искажение в любой точке кадра. Определены матрицы дисторсии ряда фотоаппаратов и сменных объективов, а также характеристики хроматических искажений для них. Для абсолютного большинства смещение красного и синего изображений максимально в углах кадра и не превышает долей пикселя. Дисторсионные искажения большинства объективов с фиксированным фокусом очень малы, порядка 0,5%. У объективов с перестройкой фокуса и у фотоаппаратов со встроенными объективами искажения находятся в диапазоне 2% – 4,5%. Для фотоаппаратов Sony и объективов Tamron показана зависимость величины дисторсионного искажения от величины фокусного расстояния. Отметим, что в данной работе исследовались единичные экземпляры фотоаппаратов и объективов из имеющихся в наличии, и авторы не претендуют на обобщение характеристик камер конкретных производителей. Данные приведены только как демонстрация возможностей предложенного метода.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **А.В.Крайский, Т.В.Миронова** Способ калибровки оптической системы. Заявка на получение патента РФ на изобретение от 17.04.2008 рег №2008114699. Патент на

изобретение №2381474. Зарегистрировано в государственном реестре изобретений РФ 10 февраля 2010 г.

2. **А.В.Крайский, Т.В.Миронова.** Калибровка оптической системы корреляционным методом. Краткие сообщения по физике ФИАН, М.,2008, №8, с. 14-24.

3. **В.Н.Боркова, А.В.Крайский, Т.В.Миронова, Т.Т.Султанов.** Измерение градиентов оптической длины с помощью корреляционной обработки цифровых фотографий случайных картин. Краткие сообщения по физике ФИАН, М.,2006, №7, с. 38-41.

A.V.Kraiski, T.V.Mironova

P.N.Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences  
119991, Moscow, Leninsky pr., 53. E-mail: [tania@itep.ru](mailto:tania@itep.ru)

### **DISTORTION AND CHROMATIC CHARACTERISTICS OF SOME CAMERAS AND REMOVABLE LENSES**

*The correlation method is used to compare the digital calibration object with the digital image obtained with optical system under test. For a set of cameras and removable lenses the distortion matrices and chromatic aberration data are obtained. For the absolute majority of cameras, the displacement between the red and the blue channels of images is maximal in the corners of the frame and is less than one pixel. Distortion of most fixed-focus lenses is very small, about 0.5%. Distortion of zoom lenses and cameras is in the range of 2% - 4.5%. For some cameras and lenses the dependence of distortion on the focal length is shown. Measurements are extremely simple, without the use of precision systems and stands. We make no prior assumptions about the properties of the function of distortion (eg, radial symmetry). We do not get a polynomial approximation of the distortion matrix, but measure directly the value of the displacement at any point of the frame.*

CAMERA CALIBRATION, CORRELATION METHOD, DISTORTION, CHROMATIC  
ABERRATION