

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МОДИФИЦИРОВАННОГО МЕТОДА ЗАЙДЕЛЯ В ФОТОГРАФИЧЕСКОЙ ФОТОМЕТРИИ

© 1997, Ю.С.Музалевский

Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург

Поступила в редакцию 27.12.96

Приведены примеры применения модифицированного метода Зайделя линейризации характеристической кривой (ХК) проявленной фотографической эмульсии. Эти примеры демонстрируют, что с помощью этого метода можно упростить методику построения ХК и ускорить редукцию фотографических изображений за ХК, а также расширить методические возможности фотографической фотометрии.

Введение

В работе [1] предложена модификация метода Зайделя аналитической аппроксимации ХК негатива, основанная на использовании дополнительных параметров коррекции D_k или T_k , связанных между собой соотношением $D_k = -\lg T_k$. Эти параметры вводятся в функцию Зайделя подобно вуали:

$$\lg(10^{D-D_k} - 1) = a \lg E + b \quad (1)$$

или

$$\lg(T_k/T - 1) = a \lg E + b. \quad (2)$$

Можно подобрать такие D_k и T_k , чтобы обеспечить справедливость соотношений (1) и (2), т.е. линейную зависимость функции Зайделя от логарифма экспозиции в области малых экспозиций, от вуали до области линейности ХК.

Если в (1) и (2) использовать инструментальные значения D и T , т.е. без учета уровня вуали, соответственно подобранные величины D_k и T_k будут представлять точное значение фотографической вуали негатива [2]. И наоборот, (1) и (2) можно рассматривать в качестве объективного критерия правильности уровня вуали, определенного любым другим способом. В [2] также приведено обоснование модификации метода Зайделя, проанализированы свойства этой модификации и упомянуто, что с ее помощью у фотографической фотометрии появляются новые методические возможности. Рассмотрим подробнее возможные варианты методики применения соотношений (1) и (2).

1. Построение ХК по массиву значений меры экспозиции для опорных точек с известными отношением экспозиций

Полученные традиционным методом [3], редуцированные за уровень вуали и усредненные по массиву измерений величины плотности или коэффициента пропускания для каждой экспозиции с помощью соотношений (1) или (2) должны быть проверены на правильность определения уровня вуали. Если все точки, особенно при малых экспозициях, легли на прямую, то уровень вуали проведен правильно. Если нет, следует подобрать параметр коррекции. Затем, при необходимости, нужно определить параметры a и b и построить аппроксимированную ХК:

$$D = \lg(10^{a \lg E + b + 1}) + D_k \quad (3)$$

или

$$T = T_k / (10^{a \lg E + b + 1}) \quad (4)$$

Параметры аппроксимации можно получить и иными способами:

- сначала дать грубую оценку уровня вуали и по виду нелинейности функции Зайделя подобрать величину поправки D_k или T_k того или иного знака;
- предварительно вуаль не оценивать, а сразу использовать измеренные величины D и T ; в этом случае величины поправок D_k или T_k окажутся уровнем вуали.

В общем случае подбор поправок в предложенных выше методиках приходится делать графически.

2. Методики построения ХК по информации о трех произвольных экспозициях

2.1. Выражения для ХК (3) и (4) содержат по три константы аппроксимации. Для их определения в принципе достаточно трех независимых уравнений, которые можно получить при трех произвольных значениях экспозиции. Рассмотрим подробнее эту процедуру в варианте аппроксимации, использующем коэффициенты пропускания (4). Уравнение (3) приводит к тому же результату, но несколько более сложным путем. Для трех фиксированных экспозиций имеем:

$$\begin{aligned} \lg(T_k/T_1 - 1) &= a \lg E_1 + b \\ \lg(T_k/T_2 - 1) &= a \lg E_2 + b \\ \lg(T_k/T_3 - 1) &= a \lg E_3 + b, \end{aligned} \quad (5)$$

где T_i — коэффициенты пропускания негатива, соответствующие экспозициям E_i , $i = 1, 2, 3$. После несложных преобразований получим (6):

$$(T_k/T_3 - 1)N_1(T_k/T_1 - 1)N_2 = (T_k/T_2 - 1)N_1 + N_2,$$

где:

$$N_1 = \lg(E_1/E_2), \quad a \quad N_2 = \lg(E_2/E_3). \quad (7)$$

Уравнение (6) относительно T_k нелинейно и решается только для конкретных значений всех параметров численными методами. Оно несколько упрощается, если ввести соотношение:

$$\lg(E_1/E_2) = m \lg(E_2/E_3), \quad (8)$$

При этом N_1 и N_2 окажутся связанными:

$$N_1 = m N_2.$$

С учетом (8) уравнение (6) принимает вид (9):

$$(T_k/T_3 - 1)m(T_k/T_1 - 1) = (T_k/T_2 - 1)m + 1.$$

Уравнение (9) несколько проще, чем (6), но также требует для своего решения численных методов. Зная T_k , несложно вычислить a и b .

2.2. Уравнение (9) для T_k решается в общем виде, если $m=1$, т.е. когда три экспозиции в логарифмическом масштабе отстоят друг от друга на равные расстояния [1]. В этом случае имеем:

$$\lg(E_1/E_2) = \lg(E_2/E_3) = H, \quad (10)$$

$$T_k = T_2((2T_1T_3 - T_2(T_1 + T_3))/(T_1T_3 - T_2^2)), \quad (11)$$

$$a = \lg((T_k/T_1 - 1)/(T_k/T_2 - 1))/H, \quad (12)$$

$$b = \lg(T_k/T_1 - 1) - a \lg E_1. \quad (13)$$

Формулы (11)-(13) дают однозначное положение прямой в координатах Зайделя по трем измерениям коэффициентов пропускания негатива при экспозициях, удовлетворяющих соотношению (10). По этим формулам несложно написать программу для компьютерной обработки негативов. Пример такой программы приведен в [4]. Аппроксимация использовалась в научных исследованиях, например в работе [5].

2.3. Для случая $m = 0$ уравнение (9) превращается в тождество, и поэтому T_k определить невозможно. Эта ситуация возникает при $N_1=0$, что означает совпадение первых двух экспозиций, $E_1=E_2$ и $T_1=T_2$. Как следствие, первые два уравнения в системе (5) оказываются одинаковыми, и число уравнений становится меньше числа неизвестных. В этом случае аппроксимация ХК возможна лишь при наличии достаточно точной дополнительной информации о вуали либо о контрасте [2], до которого проявлен негатив.

Интересно, что аналогичная ситуация возникает и при $m = -1$.

3. Примеры построения ХК по информации о трех произвольных экспозициях

В качестве примера рассмотрим построение ХК по трем равноотстоящим экспозициям для популярных в научной фотографии фотоматериалов с различными характеристиками: фотопластинок KODAK 103a-O и ORWO ZU-2 и специальной фотопленки типа А-600, обладающей меньшей чувствительностью, но большим контрастом.

Фотоматериалы экспонировались с помощью стандартного сенситометра ФСР-41, снабженного ступенчатым клином с шагом, равным 0,15 в единицах плотности, и проявлялись кюветным методом. Использовались: проявитель УП-2, кислый фиксаж, промывка проточной водой после каждой операции. Коэффициенты пропускания T изображений полей клина измерялись с помощью микрофотометра МФ-2, снабженного устройством сканирования негатива и системой регистрации. Сканирование изображения осуществлялось вдоль изображения клина. Данные о величине пропускания каждого поля получались путем усреднения записи пропусканий в пределах изображения одного поля клина. Затем учитывалась нелинейность амплитудной характеристики микрофотометра.

На рис.1 представлены типичные для этих фотоматериалов зависимости функции Зайделя от

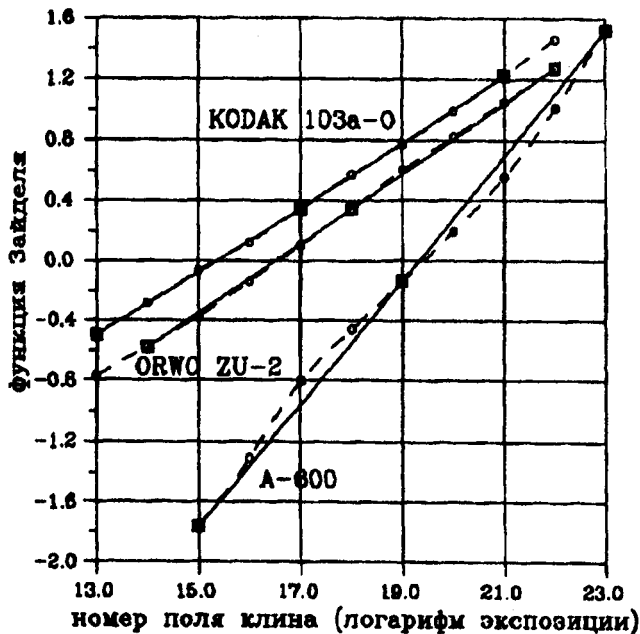


Рис.1. Зависимость функции Зайделя от логарифма экспозиции для трех типов фотографических материалов.

Пояснения в тексте.

логарифма экспозиции, построенные по модифицированной методике (сплошные линии). Параметры аппроксимации вычислялись по формулам (10) — (13), поскольку во всех трех случаях были взяты равноотстоящие реперные точки. Эти точки на рис.1 обозначены квадратами, а экспериментальные точки по другим полям — кружками. Функции Зайделя, построенные по всем точкам клина, обозначены штриховыми линиями. На рис.2 приведены ХК этих же фотоматериалов, построенные по всем точкам клина (кружки, штриховые линии), и их аппроксимации (сплошные линии). Нетрудно видеть, что аналитическая аппроксимация ХК для всех трех фотоматериалов оказалась успешной. Максимальные погрешности аппроксимации в процентах освещенности для приведенных примеров составляют: для KODAK 103a-O — 5,3%, для ORWO ZU-2 — 7,15% и для A-600 — 12,2 %.

Следует отметить, что, как правило, различия точных ХК и их аппроксимаций носят колебательный характер с периодом, практически равным диапазону представления ХК. Это малозаметно у пластинок, но хорошо видно у пленки А-600, что и определяет относительно большую ошибку ее аппроксимации.

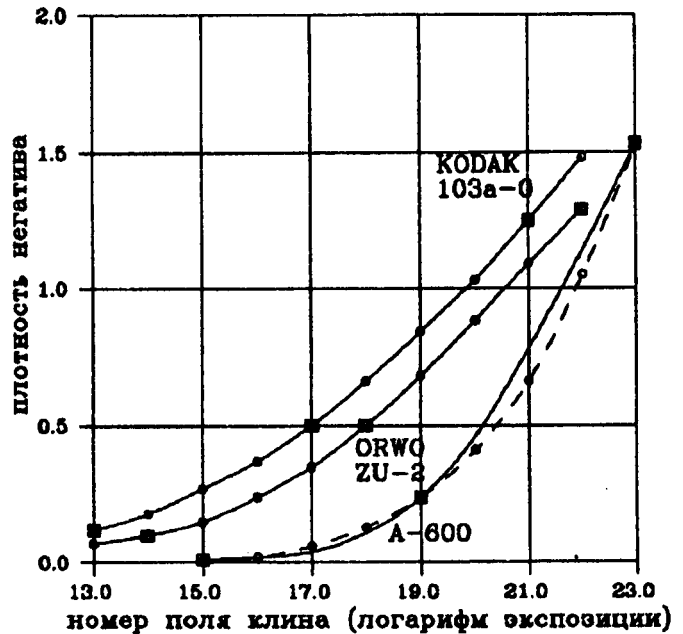


Рис.2. Характеристические кривые для фотоматериалов рис.1. (Сплошные линии — аппроксимации ХК по трем точкам, обозначенным квадратами; штриховые — истинные ХК, построенные по полям ступенчатого ослабителя).

Приведенные примеры подтверждают, что предложенная модификация метода Зайделя позволяет получать аналитическую аппроксимацию ХК фотоматериала с достаточной для практической фотографической фотометрии точностью.

4. Восстановление ХК по изображению

Если у объекта исследования известны три области, для которых известны соотношения интенсивностей излучения, то построить ХК негатива можно и без калибровочных экспозиций, получаемых с помощью ступенчатого ослабителя.

Для примера использован фотоснимок участка поверхности Солнца, полученный стратосферной солнечной астростанцией в течение третьего полета [6]. Пленка типа ФТ-30, проявлена по стандартной методике во ВНИИХИМФОТОПРОЕКТе, негатив 2095. На снимке имеется изображение солнечного пятна с тенью и полутенью, окруженного невозмущенной фотосферой. В литературе известны различные оценки относительной яркости фотосферы, а также полутени и тени пятна Солнца для разных спектральных диапазонов

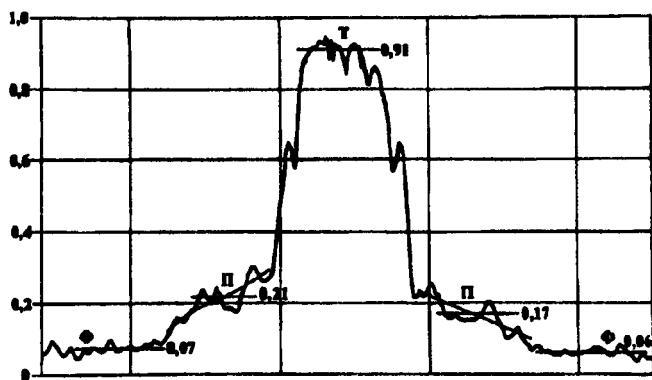


Рис.3. Пример фотометрического разреза негативного изображения солнечного пятна. Т — область тени пятна, П — область полутени пятна, Ф — область невозмущенной фотосферы.

и для разных индивидуальных свойств пятен. Для спектрального диапазона, реализованного в камере прямых снимков астростанции, были выбраны следующие данные относительных яркостей [7, с.162, 164], совпадающие с относительными экспозициями, поскольку все пятно сфотографировано при одной выдержке:

$$I_p/I_\Phi = 0,65 \quad \lg(I_p/I_\Phi) = -0,187,$$

$$I_t/I_\Phi = 0,2 \quad \lg(I_t/I_\Phi) = -0,699,$$

где I_Φ — яркость фотосферы, I_t — тени, а I_p — полутени пятна.

На рис.3 приведен микрофотометрический профиль пропусканий изображения пятна Солнца на негативе 2095. Темная центральная часть пятна соответствует наиболее прозрачной части изображения. Профиль получен с помощью микрофотометра МФ-2, сигнал на выходе детектора которого регистрировался на ленте самописца. Площадь щели микрофотометра была на 1,5 порядка меньше площади мелких деталей на изображении. Поскольку пленка ФТ-30 обладает очень высоким разрешением, зернистость эмульсии на регистрограмме не видна. На рис.3 показаны уровни пропускания тени (Т) и полутени (П) пятна, а также фотосферы (Ф). Измеренные данные были усреднены по четырем фотометрическим разрезам, полученным для разных азимутальных направлений изображения пятна.

На рис.4 показана зависимость функция Зайделя от логарифма экспозиции. В данном случае величины коэффициентов пропускания были сразу приведены к уровню вуали. Поскольку уровень

вуали был хорошо известен, подбирать Т оказалось излишним, все точки Т, П и Ф хорошо легли на прямую.

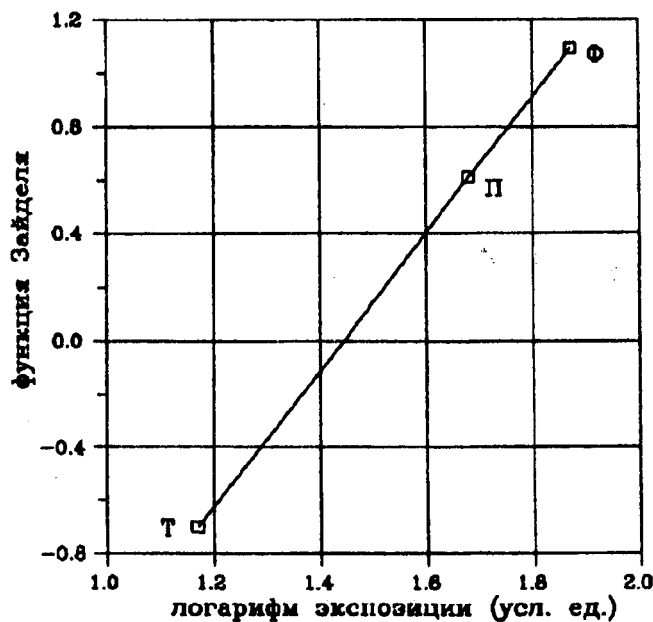


Рис.4. Зависимость функции Зайделя от логарифма экспозиции для фотопленки ФТ-30, построенная по трем точкам изображения солнечного пятна рис.3.

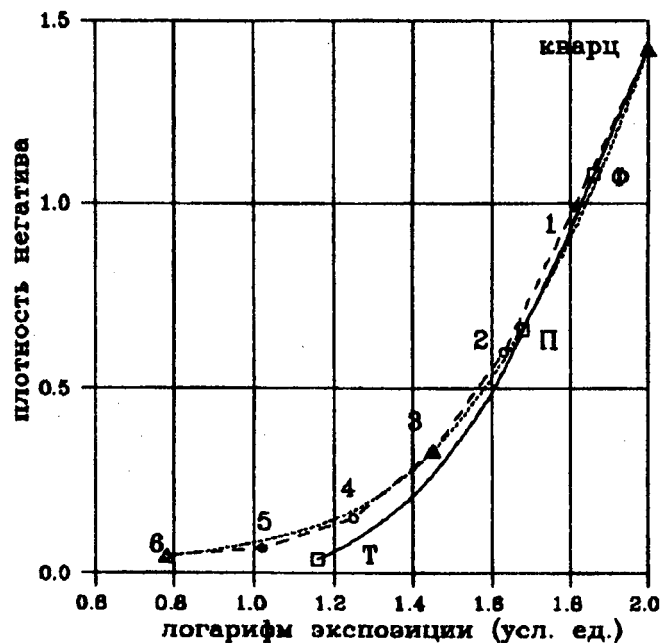


Рис.5. Восстановленная ХК по функции Зайделя рис.3 (сплошная линия). Точечная линия — истинная ХК пленки ФТ-30; штриховая линия — ХК по дополнительному клину, истинная и восстановленная по трем точкам (обозначены треугольниками).

На рис.5 представлена восстановленная ХК пленки ФТ-30 (сплошная линия), соответствующая прямой рис.4. На этом же рисунке приведена ХК, построенная по ступенчатому ослабителю (штриховая линия), который впечатывается в каждый кадр камеры прямых снимков. Обе ХК совмещены в точке Ф. По обеим ХК на рис.5 видно, что они совпадают с достаточной для практики точностью на участке от плотности 0,6, соответствующей полутени П, до плотности 1,4, большей плотности изображения фотосферы Ф. Поэтому область фотосферы и полутени можно практически без дополнительных ошибок фотометрировать, применяя восстановленную ХК вместо построенной по стандартной методике [8].

В области плотностей, соответствующих тени пятна Т, кривые расходятся. Величина расходимости в логарифмах интенсивности равна 0,17, что соответствует для данной точки относительной ошибке интенсивности порядка 15%. Причиной этого может быть как свойство аппроксимации, так и ошибки задания яркости тени I. Рассмотрим эти факторы подробнее.

Для оценки ошибки аппроксимации восстановим ХК по трем полям ступенчатого ослабителя. Возьмем в качестве реперных точек измерения на кварцевом поле этого клина, а также на третьем и на шестом полях, считая от кварцевого поля. Восстановленная таким образом ХК приведена на рис.5 пунктирной линией. Нетрудно видеть, что эта последняя ХК мало отличается от построенной по ступенчатому ослабителю (кружки, штриховая линия). В реперных точках, обозначенных треугольниками, кривые совпадают. Максимальное расхождение этих кривых составляет 0,06 в логарифмах экспозиции, или относительной ошибке интенсивности порядка 7,2%. Отсюда следует, что основной вклад в ошибку приведенной выше аппроксимации по трем точкам на изображении пятна дает неточность задания относительной яркости тени.

Если определить относительную интенсивность полутени и тени по измеренным плотностям и ХК, полученным с помощью полей ступенчатого ослабителя, то получим следующие соотношения:

$$I_p/I_\Phi = 0,614 \quad \lg(I_p/I_\Phi) = -0,212,$$

$$I_t/I_\Phi = 0,0812 \quad \lg(I_t/I_\Phi) = -1,092.$$

В литературе можно встретить подтверждение, что такие соотношения интенсивностей являются правдоподобными [9, с.110-111, 144].

Таким образом, в приведенном примере причина

потери точности восстановления ХК в области малых экспозиций мало связана со свойствами предложенного метода аппроксимации и главным образом определяется точностью априорных данных о соотношении яркостей деталей изображения.

Следует обратить внимание еще на одну особенность применения такого метода восстановления ХК. Слишком низкий ход восстановленной ХК в области тени мог, в принципе, означать и неверную оценку вуали. Несмотря на то, что на рис.4 все три точки неплохо легли на прямую, возможную искривленность функции Зайделя можно было и не заметить, поскольку точка Т лежит довольно далеко от уровня вуали. В приведенном примере причиной появления сравнительно больших ошибок являлась неточность априорных данных, поскольку по многим другим данным известно, что в данном случае уровень вуали проведен хорошо. Но в общем случае целесообразно выбирать реперные точки не на линейном участке ХК, а в на ее начальном участке, поближе к вуали. Это обусловлено тем, что практическое применение метода Зайделя, в том числе и модифицированного, необходимо в первую очередь в области недодержек, а не на линейном участке ХК.

5. Построение ХК по трем разным длительностям экспозиции

По аналогии с предыдущим примером три различные экспозиции одной и той же области изображения объекта можно получить, фотографируя объект на одном и том же образце фотоматериала три раза с разными длительностями экспозиции. При этом точность фотометрии может несколько снизиться из-за влияния отклонений от закона взаимозаменяемости [10]. Тем не менее, и в этом случае задача фотометрии без специальной калибровки с применением ослабителей принципиально разрешима.

На рис.6 сплошной линией приведен пример построения ХК фотопленки ФТ-30 по трем экспозициям разной длительности одного и того же участка фотосферы Солнца в течение того же третьего полета стратосферной аэростанции [6], что и в предыдущем примере, негативы 2527, 2428 и 2429. По предполетным испытаниям электромагнитного затвора камеры прямых снимков аэростанции были известны отношения трех фиксированных выдержек:

$$t_1/t_2 = 3,84 \pm 0,14 \quad \lg(t_1/t_2) = 0,584 \pm 0,016,$$

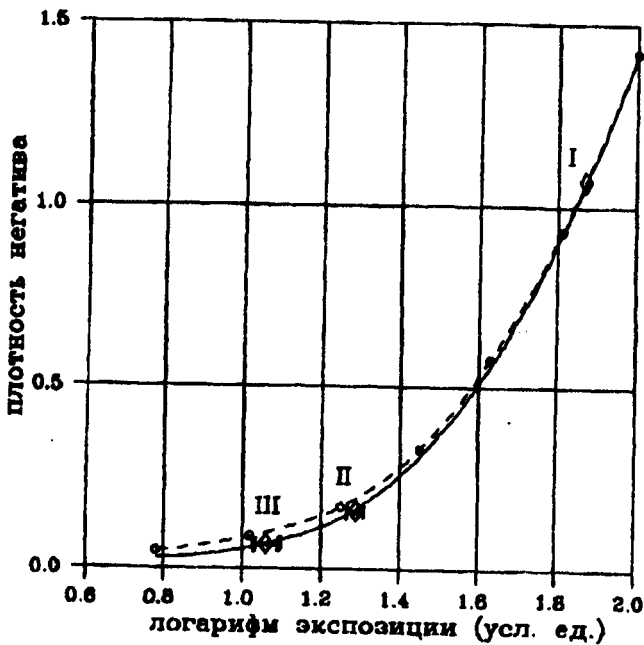


Рис.6. Восстановленная ХК по трем экспозициям одной области объекта (обозначены цифрами и ромбами). Штриховая линия — истинная ХК пленки ФТ-50.

$$t_2/t_3 = 1,71 \pm 0,04 \quad \lg(t_2/t_3) = 0,233 \pm 0,01.$$

Поскольку на всех трех негативах измерения проводились по одним и тем же деталям объекта, т.е. в областях с одинаковыми интенсивностями, эти данные можно использовать в качестве отношений экспозиций. Негативы измерялись на том же микрофотометре МФ-2 с регистрацией и по той же методике, что и в предыдущем примере. Коэффициенты аппроксимации определялись графически. Реперные точки на рис.6 обозначены ромбами.

На рис.6 приведена также ХК, построенная с помощью традиционного метода по данным ступенчатого ослабителя (штриховая линия). Если сравнить эти кривые, можно видеть, что в области плотностей от 0,4 до 1,4 они практически совпадают. При $D = 0,4$ различие кривых дает ошибку оценки логарифма экспозиции 0,02, что эквивалентно ошибке определения освещенности 3,7%. В области недодержек различие кривых возрастает, и при $D = 0,2$ составляет соответственно 0,06 для логарифма экспозиции и 6,5% для освещенности. В области вуали кривые снова сходятся, но из-за малого градиента ошибка оценки освещенности не уменьшается.

На рис.6 показаны доверительные интервалы положений реперных точек аппроксимации ХК,

обусловленные разбросом времен срабатывания электромагнитного затвора камеры прямых снимков. Не исключено, что этот разброс реально мог быть больше из-за жестких температурных условий работы затвора во время полета в течение 10 часов на высоте 20 км. Нетрудно видеть, что ошибки аппроксимации ХК сравнимы с ошибками, обусловленными разбросом длительности экспозиций.

Продемонстрированная выше методика построения ХК по трем разным длительностям экспозиции может быть полезна для случаев, когда сложно организовать калиброванное изменение интенсивности потока излучения, например при фотографировании в рентгеновском диапазоне длин волн. Другая область возможного применения этого метода — импульсное освещение объекта, при котором можно использовать освещение фотоматериала разным числом одинаковых импульсов.

Выводы

1. Модифицированный метод Зайделя и информация о трех реперных точках на ХК позволяет аппроксимировать всю ХК в виде аналитической функции с точностью в единицы процентов, достаточной для практической фотометрии.

2. Нелинейность зависимости функции Зайделя, характерная для некоторых специальных фотоматериалов и имеющая систематический характер типа "волны", определяет основную ошибку аппроксимации ХК для такого типа эмульсий.

3. Точность аппроксимации зависит от выбранного диапазона экспозиций:

— точность снижается при расширении диапазона экспозиций;

— точность на линейном участке выше точности вблизи вуали;

— точность в диапазоне между крайними реперными точками выше, чем точность аналитического продолжения ХК вне этого диапазона.

4. Реперными полями могут служить не только поля ступенчатого ослабителя, но и поля изображения объекта, относительные яркости которых известны, или одинаковые поля разных изображений одного объекта на одном образце фотоматериала, полученных с разными известными экспозициями.

5. В некоторых случаях для восстановления ХК

может оказаться достаточным знать только две реперные точки, если дополнительно привлечь априорную информацию об уровне вуали негатива или о контрасте, до которого он проявлен.

Дополнение

Автор благодарит И.И.Брейдо, Э.В.Кандрашова, Л.Н.Галль и И.Б.Птицыну за внимание к данной работе и помощь при подготовке публикации.

Литература

1. *Музалевский Ю.С.* Метод аналитической аппроксимации характеристической кривой фотоматериала. Проблемы космической физики. Киев: Вища школа, 1981; (16): 122-7.
2. *Музалевский Ю.С.* Аналитическая аппроксимация характеристической кривой проявленной фотографической эмульсии. Научное приборостроение 1997; 7 (1-2): 73-8.
3. *Мельников О.А., Михельсон Н.Н., Брейдо И.И.*

и др. Курс астрофизики и звездной астрономии. Т.1. Методы исследований и аппаратура. М.: Наука, 1973. 608 сс.

4. *Кандрашов Э.В., Музалевский Ю.С.* Быстрая программа перевода пропусканий негатива в интенсивности с помощью ЭВМ. Фотометрия и ее метрологическое обеспечение. Тез. докл. 4-й Всес. научно-технич. конфер. 1982: 165.

5. *Кандрашов Э.В., Теплицкая Р.Б.* Геомагнетизм и аэрономия 1980; (52): 25-31.

6. *Крат В.А., Дулькин Л.З., Музалевский Ю.С. и др.* Третий полет советской стратосферной солнечной обсерватории. Астрон циркуляр 1970; (597): 1-3.

7. *Миннарт М.* Солнечная система. Т.1. Солнце. Под ред. Дж.Койпера. М: ИЛ, 1957.

8. *Мельников О.А., Михельсон Н.Н., Брейдо И.И. и др.* Курс астрофизики и звездной астрономии. Изд.3-е. Т.1. Методы исследований и аппаратура. М.: Наука, 1973, 608 с.

9. *Bray R.J., Loughhead R.E.* Sunspots. London: Chapman and Hall Ltd., 1964.

10. *Муз К., Джеймс Т.* Теория фотографического процесса. Л.: Химия, 1973. 572 сс.

PECULIARITIES OF MODIFIED SEIDEL METHOD APPLICATION TO PHOTOGRAPHIC PHOTOMETRY

Yu.S.Muzalievsky

Institute for Analytical Instrumentation RAS, St.Petersburg

Examples of modified Seidel method of developed photographic emulsion characteristic curve (CC) linearization are given. These examples show that the method of CC construction may be simplified, the CC reducing of photographic images may be accelerated, and methodical possibilities of photographic photometry may be expanded by using this method.