

## ЦИФРОВОЙ МЕТОД ОБРАБОТКИ СПЕКТРОСЕНСИТОГРАММ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ФОТОЭМУЛЬСИЙ

*Л. Г. Антропова, В. С. Рылов, М. Ф. Шабанов, А. Ч. Узденов*

Описан цифровой метод обработки спектросенситограмм на ЭВМ М-222 для исследования информационных свойств фотоэмульсий. Он отличается высокой точностью и позволяет оперативно получать величины фотографического шума и отношения сигнал/шум в зависимости от уровня освещенности, длины волны, площади фотометрируемого участка. Приведены первые результаты исследования фотопластинок Кодак 103аО, Кодак 103аF и фотопленок А-500, А-600, А-700.

A digital method of spectro-sensitogram processing with an M-222 computer used to investigate the informative properties of photoemulsions is described. The method is notable for its high accuracy and allows to obtain readily the photographic noise and the signal-to-noise ratios depending on the illumination, the wavelength, and the photometric area. The first results of investigation of Kodak 103aO, 103aF and A-500, A-600, A-700 photoemulsions are presented.

Фотографическая эмульсия представляет собой редкий пример светоприемника, сочетающего в себе такие свойства, как огромную информационную емкость на единицу светочувствительной площади, динамический диапазон, достигающий у ядерных эмульсий  $10^6$ , высокую разрешающую способность до 200 пар линий/мм и простоту обращения и обработки. Помимо этого фотоэмульсия является удобным и надежным носителем зарегистрированной информации. К недостаткам ее относятся трудоемкость съема информации и недостаточная светочувствительность. Повышение светочувствительности достигается применением электронно-оптических преобразователей. Проблема автоматизации количественной обработки фотоизображений и спектрограмм может быть успешно решена с помощью ЭВМ. Для этого необходимы устройства ввода и вывода фотоизображений в ЭВМ и соответствующее математическое обеспечение.

Машинная обработка позволяет оперативно и точно осуществлять преобразование почернений в интенсивности, устранять известные инструментальные искажения изображений и спектрограмм, фильтровать фотографические шумы и в ряде случаев решать астрофизические задачи. Объективность и полнота первичного материала, получаемого при обработке негативов на ЭВМ, существенно повышают эффективность астрофизических исследований. Это особенно важно при обработке фотографических данных, получаемых на таком уникальном телескопе как БТА.

Очевидно, что корректная цифровая обработка негативов немислима без знания информационных характеристик астрономических фотоэмульсий. Прежде всего таких, как фотографические шумы, отношение сигнала к шуму, число объективно различимых градаций, спектральная светочувствительность, частотно-контрастные характеристики, информационная емкость и информационная чувствительность. В связи с этим, а также с целью научно обоснованного применения астрономических фотоматериалов в наблюдениях разработан и реализован цифровой метод обработки спектросенситограмм.

До настоящего времени качество астрономических фотоэмульсий оценивалось по характеристической кривой, коэффициенту контраста (гамма), чув-

ствительности, определяемой по уровню почернения, разрешению в линиях на мм. Эти оценки носят качественный характер, они не дают точного представления о чувствительности, точности фотометрирования и разрешении фотоэмульсии. В работах [1, 2] предложено оценивать качество фотоматериалов по величине шумов, отношению сигнал/шум (ОСШ), числу объективно различимых градаций, частотно-контрастной характеристике (ЧКХ), информационной емкости и информационной чувствительности. Эти параметры дают количественные характеристики фотоэмульсии. Важнейшими из них для решения упомянутых задач являются фотографические шумы и ОСШ.

Различают два вида фотографических шумов: мелкомасштабные флуктуации почернения (микрошумы) и крупномасштабные флуктуации (макрошумы) [3]. Первые отражают флуктуации числа проявленных зерен на фотометрируемой площадке, вторые вызваны неоднородностью фотослоя, неравномерным вуалированием, неоднородностью проявления и другими причинами. В практике фотометрирования астрономических негативов макро- и микрошумы неразделимы.

Для фотоэмульсии ОСШ представляет собой функцию четырех параметров: количества энергии излучения, падающего на единицу площади за единицу времени в регистрируемом спектральном интервале, длины волны регистрируемого излучения, площади элемента, которым фотометрируется негатив, и времени экспозиции. Достоинства ОСШ в сравнении с другими применяемыми параметрами следующие:

- а) характеризует точность фотометрирования;
- б) применим для всех приемников;
- в) вычисляется непосредственно по измерениям уровня почернения над вуалью и среднеквадратичной флуктуации почернения (фотографического шума);
- г) по измерениям ОСШ непосредственно определяется чувствительность, соответствующая заданной точности фотометрирования;
- д) по зависимости ОСШ от площади фотометрируемого элемента определяется размер элемента дискретизации и число градаций на элемент для цифрового описания фотоизображений, и, кроме того, оценивается разрешающая способность фотоматериала;
- е) для исследования зависимости ОСШ от уровня освещенности, длины волны регистрируемого излучения и площади элемента достаточно одной спектросенситограммы.

## 1. Получение спектросенситограмм

Спектросенситограммы получают на спектросенситометре ИСП-73. Каждая из них содержит до 13 полосок спектра калиброванной ленточной лампы накаливания в диапазоне длин волн от 400 до 1000 нм. Логарифм освещенности для каждой последующей полосы, начиная с самой яркой, уменьшается на 0.2 дырчатыми ослабителями спектросенситометра. Размер спектросенситограммы  $9 \times 12$  см, ширина каждой полосы 4—5 мм. Фильтрами из нейтральных стекол НС-8 и НС-10 световой поток ленточной лампы ослабляется более чем в  $10^3$  раз. Этим обеспечивается увеличение длительности экспозиции до нескольких минут и более. Чаще всего использовались экспозиции от 3 до 10 мин. Проявление осуществляется в проявителях MWP-2 и D-19, рекомендованных изготовителями фотоэмульсий и проверенных нами.

## 2. Оцифровка спектросенситограмм

Измерение пропускания на полях спектросенситограммы производится с помощью преобразователя «спектр — код» с выводом данных о почернениях на перфоленту. Преобразователь позволяет автоматически сканировать негатив по одной координате, производить отсчеты с дискретностью от 0.01 до 0.16 мм и со скоростью до 20 отсчетов/сек. Величина пропускания

для каждого отсчета записывается одним из 1000 квантованных уровней. Размер фотометрируемого элемента изменяется щелью микрофотометра (МФ-2) от нескольких микрон до десятых долей миллиметра. Сканирование спектросенситограмм осуществляется поперек полос на выбранной длине волны спектра и с выбранным размером элемента. Каждое поле сенситограммы при одном сканировании записывается на перфоленте массивом из 200—300 отсчетов. Первым записывается массив отсчетов для уровня вуали, а затем идут поля в порядке уменьшения пропускания. Для каждой спектросенситограммы выполняется сканирование по 5—6 длинам волн и с 5—6 размерами щели. Каждое сканирование дает комплект массивов отсчетов, соответствующих уровню вуали и полям спектросенситограммы.

### 3. Программа обработки спектросенситограмм

Программа составлена на алгоритмическом языке «АЛГОЛ-60» для ЭВМ М-222. Комплект исходных данных на перфоленте, соответствующий одному сканированию спектросенситограммы, вводится в автоматическом режиме в оперативное запоминающее устройство ЭВМ. Сервисная программа «пакетного» ввода данных с перфолент преобразователя «спектр — код» в ЭВМ написана А. А. Коровяковой. К каждому комплекту данных вводится заголовок и служебная перфокарта с указанием уровня освещенности для каждого поля сенситограммы. Для последующей обработки на ЭВМ по другим программам комплект данных уже в коде этой машины записывается на перфокарты или магнитную ленту. Вся программа от ввода с перфоленты до распечатки результатов обработки работает в цикле, что позволяет обрабатывать нужное число комплектов, данных при однократном вводе рабочих программы. Время счета для комплекта из 12 массивов (вуаль и 11 полей спектросенситограммы) по 250 отсчетов занимает не более 3 мин.

Программа реализует следующий алгоритм:

а) нахождение среднего отсчета по полю сенситограммы

$$\bar{X}_l = \sum_{i=1}^n X_{l,i} / n,$$

где  $X_{l,i}$  —  $i$ -й отсчет пропускания на  $l$ -м поле спектрограммы;  $l$  — номер поля (массива);  $n$  — число отсчетов в массиве;

б) вычисление среднеквадратичного отклонения от среднего отсчета

$$\sigma_l = \sqrt{\left( \sum_{i=1}^n (X_{l,i} - \bar{X}_l)^2 \right) / (n-1)};$$

в) исправление ложных отсчетов в массиве по критерию  $3\sigma_l$ , т. е., если  $|X_{l,i} - \bar{X}_l| \geq 3\sigma_l$ , то  $X_{l,i}$  присвоит значение  $\bar{X}_l$ ;

г) повторное вычисление  $\bar{X}_l$  и  $\sigma_l$  для исправленного массива;

д) вычисление модуля среднеарифметического отклонения

$$\Delta \bar{X}_l = \sum_{i=1}^n (\bar{X}_{l,i} - \bar{X}_l) / n;$$

е) построение гистограммы распределения среднеквадратичных отклонений (фотографического шума) в диапазоне от  $-3\sigma_l$  до  $3\sigma_l$  с шагом  $0.5\sigma_l$ ;

ж) вычисление ОСШ по среднеарифметическим (ОСШ 1) и среднеквадратичным отклонениям (ОСШ 2)

$$\text{ОСШ 1} = (\bar{X}_0 - \bar{X}_l) / \Delta \bar{X}_l; \quad \text{ОСШ 2} = (\bar{X}_0 - \bar{X}_l) / \sigma_l,$$

где  $\bar{X}_0$  — средний отсчет по полю вуали.

После выполнения этого алгоритма заканчивается первая часть программы и производится распечатка результатов на широкой бумажной ленте. Начинается она с заголовка, где указывается тип эмульсии, длина волны, проявитель, размер элемента, номера полей спектросенситограммы. Затем в виде столбцов, где каждому полю соответствует строка, печатаются число отсчетов для каждого поля, число ложных отсчетов, значения параметров  $\bar{X}_l$ ,  $\Delta\bar{X}_l$ ,  $\sigma_l$ , ОСШ 1, ОСШ 2 и гистограмма.

Вторая часть программы, используя полученные результаты, реализует следующий алгоритм:

а) вычисляются коэффициенты для кусочно-линейной интерполяции калибровочной кривой для перехода от пропусков к освещенностям:

$$K_l = (E_l - E_{l-1}) / (\bar{X}_{l-1} - \bar{X}_l),$$

где  $E_l$  — величины освещенностей для полей спектросенситограммы взяты из паспорта спектра сенситометра;

б) осуществляется переход к шкале освещенностей для каждого отсчета  $X_{l,i}$  из комплекта данных

$$E_{l,i} = E_l + K_l (\bar{X}_{l-1} - X_{l,i});$$

в) с массивами отсчетов  $E_{l,i}$  так же, как с  $X_{l,i}$ , выполняется программа, аналогичная первой части, от пункта а) до е), и получаются параметры  $\bar{E}_l$ ,  $\Delta\bar{E}_l$ ,  $\sigma_{l,E}$  и гистограмма распределения  $\sigma_{l,E}$ ;

г) вычисляется ОСШ в шкале освещенностей по среднеарифметическим (ОСШ 3) и среднеквадратичным отклонениям (ОСШ 4)

$$\text{ОСШ 3} = \bar{E}_l / \Delta\bar{E}_l, \quad \text{ОСШ 4} = \bar{E}_l / \sigma_{l,E}.$$

Результаты печатаются как и в предыдущем случае, с той лишь разницей, что в первом столбце печатаются паспортные данные  $E_l$ , во втором — вычисленные освещенности  $\bar{E}_l$ , затем модуль среднеарифметической ошибки  $\Delta\bar{E}_l$ , среднеквадратичная фотометрическая ошибка  $\sigma_{l,E}$ , ОСШ 3 и ОСШ 4.

Таким образом, после обработки одного комплекта данных (одного сканирования) мы получаем величины фотографического шума и ОСШ ( $\sigma$  и ОСШ 2) в зависимости от уровня почернения и освещенности, фотометрическую ошибку и ОСШ в шкале освещенностей ( $\sigma_E$  и ОСШ 4) в зависимости от уровня освещенности. Обработка нескольких сканирований на различных длинах волн и с разными размерами элемента, устанавливаем зависимость этих четырех параметров ( $\sigma$ ,  $\sigma_E$ , ОСШ 2, ОСШ 4) от длины волны и площади элемента. В качестве дополнительных данных получают среднеарифметические величины ошибок и ОСШ ( $\Delta\bar{E}$ ,  $\Delta\bar{X}$ , ОСШ 1, ОСШ 3) в зависимости от уровней почернения и освещенностей, длины волны, площади элемента.

#### 4. Особенности метода и некоторые результаты обработки спектросенситограмм

Ни один из известных авторов методов не позволяет получить величины фотографического шума и ОСШ в шкале пропусков и освещенностей непосредственно после обработки спектросенситограммы. Большая скорость обработки позволяет менее чем за час получить зависимости этих параметров от уровней почернения и освещенностей, длины волны, площади элемента. Наиболее трудоемкими в этом методе являются получение спектросенситограмм и оцифровка их. Тем не менее уже сейчас, при разработке метода, время получения результатов существенно меньше времени анализа их. Дальнейшее расширение возможностей метода будет достигаться за счет создания новых программ. В настоящее время ведется работа над программой для построения кривых спектральной чувствительности, определения числа объективных градаций и информационной емкости. С другой стороны,



мы стремимся для решения каждой задачи дать минимальный набор характеристик фотоматериалов, чтобы упростить их практическое использование. С этой целью наряду с числовыми данными будут автоматически выдаваться графики и диаграммы с помощью графопостроителей, подключенных к ЭВМ М-222.

К настоящему времени нами обработано более 15 спектросенситограмм для астрономических фотопластинок Кодак 103аО, Кодак 103а фотоленок А-500, А-600, А-700, изготовленных в 1973—1974 гг. Это составило более 150 сканирований и более 2000 полей спектросенситограмм. На практике проверена эффективность метода и накоплен материал для анализа свойств упомянутых фотоматериалов. Основываясь на полученных результатах для исследованных фотоэмульсий, можно сделать следующие выводы:

1. Зависимости величины шума и ОСШ от уровней почернения и освещенностей для названных фотоматериалов подобны и сходны с теми, что приведены в [2].

2. Величина фотографических шумов обратно пропорциональна корню квадратному из площади элемента (закон Сельвина [2]) лишь для площадок от  $0.01 \times 0.01$  мм до  $0.05 \times 0.05$  мм. Площадки меньше  $0.01 \times 0.01$  мм нами не исследовались, а для элементов больше, чем  $0.05 \times 0.05$  мм, наблюдаются заметные и систематические отклонения от упомянутого закона. Шумы убывают, а ОСШ растет медленнее, чем квадратный корень из площади элемента, и чем больше площадь элемента, тем больше это различие. Этот факт можно объяснить влиянием макрошумов, которые, как показано в [3], слабо зависят от площади элемента.

3. ОСШ в шкале пропусков для площади элемента  $0.1 \times 0.1$  мм при плотностях около 1.5 обычно больше 200—300. При плотностях больше 2.5 ОСШ может достигать 500—600. Следовательно, точность измерений почернения на элементе  $0.1 \times 0.1$  мм составляет 0.2%.

4. Точность фотометрирования в шкале освещенностей с учетом ошибок калибровки при элементе  $0.1 \times 0.1$  мм и плотностях 1—1.5 обычно около 1%.

5. Сравнивая проявители MWP-2 и D-19, мы установили, что первый из них, как правило, позволяет получить большую точность фотометрирования при равных экспозициях. Выигрыш точности фотометрирования для эмульсий 103аО и А-500, проявленных в MWP-2, составляет 2—3 раза по сравнению с проявлением в D-19. Более детальный анализ исследованных фотоматериалов будет проведен нами позднее.

#### Л и т е р а т у р а

1. Г у р е в и ч С. Б. Эффективность и чувствительность телевизионных систем, М.—Л., «Энергия», 1964, 344 с.
2. Б р е й д о И. И. Фотографические шумы, отношение сигнал/шум и число градаций, передаваемых фотографическими материалами. — Изв. Глав. астр. obs. в Пулковке, 1964, 24, № 177, с. 171—179.
3. Д о м б р о в с к и й В. А., Х р и с т и ч В. Г. Лабораторная проверка возможности выявления фотографическим путем малых градаций. — Труды Астр. obs. ЛГУ, 1969, 24, с. 63—78.