

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩИХ ФОТОПЛЕНОК М-300 И 2415 ПОСЛЕ ОЧУВСТВЛЕНИЯ В ВОДОРОДЕ

Н. А. Тихонов, М. Ф. Шабанов

Сравнивается эффективность фотоэмульсий Микрат-300, 2415 и 103а-F до очувствления и после очувствления в водороде. Исследованы их экспонетрические и информационные характеристики. Представлены кривые спектральной чувствительности, характеристические кривые и результаты измерений шумов, отношения сигнал/шум, числа градаций, квантовой эффективности и информационной емкости для этих фотоэмульсий.

Efficiency of the photographic emulsions M-300, 2415 and 103a-F is compared before and after the hypersensitization in hydrogen. Their exponential and information characteristics are investigated. The spectral sensitivity curves, characteristic curves and the results of noise measurements, signal-to-noise ratios, the number of gradations, quantum efficiency and information capacity for these emulsions are presented.

При наблюдениях на светосильных телескопах пленки 2415 фирмы «Кодак» (США) показали высокую эффективность. Существуют подобные пленки отечественного производства — Микрат-300 (М-300). Нам представляется интересным их сравнение при максимальном очувствлении. Некоторые данные по этим фотоэмульсиям имеются в справочниках [1, 2], однако они мало пригодны для астрономов, так как получены для коротких экспозиций, без привязки к абсолютной шкале и без учета возможностей очувствления. Несколько работ посвящено очувствлению фотоэмульсии 2415 и сравнению ее с другими астрофотоэмульсиями [3, 4], но в них не измерялись шумы фотоэмульсий, без чего невозможно дать количественные оценки точности фотометрии, отношения сигнал/шум (ОСШ), квантовой эффективности и числа градаций.

Мы очувствляли фотоэмульсии прогревом в атмосфере водорода по методике, описанной в [5]. Очувствленные и неочувствленные образцы экспонировались на спектросенситометре ИСП-73 с экспозицией 10 мин в спектральном интервале 400—1000 нм. Спектросенситограммы проявлялись 9 мин при 20 °С в проявителе MWP-2. Измерение спектросенситограмм проводилось на автоматическом микроденситометре АМД-1 с последующей обработкой на ЭВМ ЕС-1035, ЭВМ позволяла оперативно получать кривые спектральной чувствительности, характеристические кривые, шумы, ОСШ, число градаций и их зависимости от диффузной оптической плотности  $D$  и энергетической экспозиции  $H$ , эрг/см<sup>2</sup>. Подробнее получение спектросенситограмм и их автоматическая обработка описаны в работе [6].

Для корректного использования цифровых данных и графиков, приведенных ниже, следует отметить, что разброс характеристик астрономических фотоэмульсий составляет обычно  $\pm 30\%$ , а отдельные образцы отклоняются от среднего до 1.5—2.0 раз. Представленные средние данные для 103а-F получены нами по более чем 25 образцам разных поливов, а образцы очувствленных и неочувствленных фотоэмульсий взяты из двух поливов. Ошибка привязки наших измерений к абсолютной шкале не более  $\pm 20\%$ .

Кривые спектральной чувствительности фотоэмульсий и фотопластинок 103а-F без очувствления для уровня диффузной плотности 0.85 над вуалью представлены на рис. 1. По форме они похожи на те, что даны в справочниках [1, 2]. Спад чувствительности у М-300 начинается на  $\lambda = 650$  нм, что ограничивает ее

применение в красной части спектра. Соотношение чувствительности фотоэмульсий различно на разных  $\lambda$  (рис. 1), но в среднем 2415 в 10—12 раз, а М-300 в 20—25 раз менее чувствительны, чем 103а-Ф. Характеристические кривые неочувствленных и чувствленных фотоэмульсий для  $\lambda=600$  нм представлены на рис. 2. Линейный участок характеристических кривых фотопленок достигает диффузной плотности  $D=5$ , в то время как на 103а-Ф уже для  $D > 2.5$  начинается загиб характеристических кривых. Благодаря этому фотопленки имеют больший коэффициент контраста при одинаковом диапазоне регистрируемых освещенностей. После чувствления характеристические кривые сдвигаются влево по оси  $\lg H$ , повышается плотность вуали и заметно уменьшается контраст для начальных участков (рис. 2).

Нам не удалось использовать режимы чувствления для 2415 и 103а-Ф, рекомендованные в работах [3, 4], из-за различия техники чувствления и изменения свойств фотоэмульсий от полива к поливу. Путем многочисленных проб

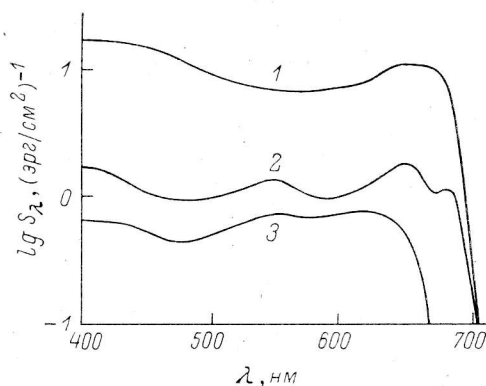


Рис. 1. Кривые спектральной чувствительности для уровня  $D=0.85$ .  
1 — 103а-Ф; 2 — 2415; 3 — М-300.

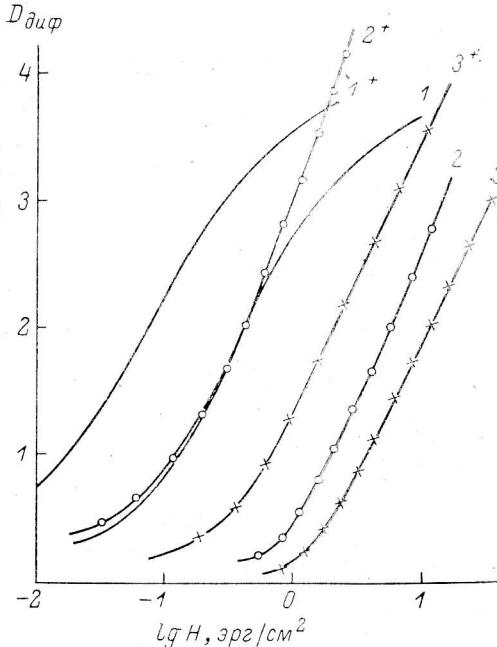


Рис. 2. Характеристические кривые фотоэмульсий до и после чувствления «+»  
1 — 103а-Ф; 2 — 2415; 3 — М-300.

установлено, что чувствление при более низких температурах дает меньший прирост плотности вуали при одинаковом росте чувствительности. Поэтому фотоэмульсии 103а-Ф и М-300 чувствлялись в контейнерах с водородом при температуре 21 °С, что дает повышение чувствительности 103а-Ф в 3—4 раза за 48 ч, а М-300 — в 6 раз за 6 сут при росте плотности вуали на 0.2. Фотопленка 2415 при 21 °С чувствляется медленно, и поэтому температура в контейнерах повышалась до 50 °С, что дает увеличение чувствительности в 10—12 раз за 15 ч при том же росте плотности вуали. По нашим экспериментам указанные выше режимы чувствления близки к оптимальным. Здесь даны коэффициенты чувствления для экспозиции 10 мин, для более длительных экспозиций коэффициенты больше.

Фотографические шумы фотоэмульсий измерялись щелью  $10 \times 100 = 1000$  мкм<sup>2</sup>. Точность измерений составляла  $\pm 10$  %, а разброс для отдельных образцов  $\pm 20$  %. В среднем величина шума  $\sigma_b$  на фотопленках в 4 раза меньше, чем на фотопластинках 103а-Ф. Зависимость  $\sigma_b$  от  $D$  для обеих фотопленок сходная, причем для 2415 шум на 5—10 % меньше, чем для М-300, и составляет 0.004 для  $D=0.2$ , 0.012 — для  $D=1.0$  и растет до 0.020 для  $D=4.0$ . После чувствления величина шума возрастает обычно на 10—20 %.

Наиболее полную и наглядную характеристику эффективности фотоэмульсий дает зависимость числа градаций с шагом в одно значение шума от  $\lg H$ . Она строится по зависимости  $\sigma_b$  от  $D$  и характеристическим кривым для каждой  $\lambda$ . На рис. 3 зависимость числа градаций от  $\lg H$  представлена для  $\lambda=600$  нм. По ней определяется оптимальный диапазон засветок, динамический

диапазон по числу градаций, точность фотометрии, ОСШ, вероятность обнаружения объекта в зависимости от  $\lg H$ . Оси абсцисс на рис. 2 и рис. 3 совершенно идентичны, что позволяет легко находить по ним зависимость числа градаций от  $D$  или нужную плотность, обеспечивающую заданную точность фотометрии или ОСШ.

Кривые рис. 3 показывают, что для засветок менее  $0.03 \text{ эрг/см}^2$  очувствленная фотоэмульсия 103а-Ф не имеет конкурентов. Для  $H$  от  $0.03$  до  $3 \text{ эрг/см}^2$  наиболее эффективна очувствленная 2415, а очувствленная М-300 работает в диапазоне засветок от  $0.1$  до  $10 \text{ эрг/см}^2$ . При полной засветке диффузная плотность на 103а-Ф достигает  $4.0$ , а число градаций  $110$ . На фотопленках М-300 и 2415 плотность достигает более  $5.5$ , а число градаций  $320$  и  $355$  соответственно. Для определения точности фотометрии и ОСШ любой из представленных на рис. 3 эмульсий достаточно спроецировать отрезок ординат, равный одной шумовой градации —  $\sigma_n$ , на ось  $\lg H$  через соответствующую кривую на заданном уровне  $H$  и найти  $\sigma_H$ . Очевидно, что очувствленная фотоэмульсия 2415 имеет большую точность фотометрии, чем 103а-Ф, во всем регистрируемом диапазоне экспозиций, так как шум  $\sigma_H$  у 2415 в 5—6 раз меньше. Для определения вероятности обнаружения объекта с заданным перепадом  $\Delta H$  на заданном уровне  $H$  находится соответствующее этому перепаду число шумовых градаций путем проекции  $\Delta H$  с оси  $\lg H$  (рис. 3) на ось числа градаций через соответствующую кривую. Зная число шумовых градаций на перепад  $\Delta H$ , по гауссовому распределению величины фотографического шума находим вероятность обнаружения. Графические пересчеты, описанные выше, удобнее делать, если на рис. 3 по оси абсцисс откладывается не  $\lg H$ , а величина  $H$ . Однако в этом случае невозможно подобрать удобный масштаб на рис. 3 для фотоэмульсий, различающихся по чувствительности более чем в 10 раз.

Отношение сигнал/шум и квантовая эффективность детектирования (КЭД или DQE) определяются соотношениями [7]:

$$\text{ОСШ} = H/\sigma_H = 0.4343\gamma/\sigma_D; \quad (1)$$

$$\text{КЭД} = (\text{ОСШ}_{\text{вых}})^2/(\text{ОСШ}_{\text{вх}})^2 = (0.4343\gamma)^2/\sigma_D^2 H_R, \quad (2)$$

где  $H_R$  — экспозиция в квантах.

Так как величина шума растет с увеличением экспозиции, то, согласно (1), максимальное значение ОСШ будет соответствовать началу прямолинейного участка характеристической кривой, где  $\gamma$  близко к максимуму. Максимальное значение КЭД соответствует плотностям, меньшим чем для максимума ОСШ, но близким к ним. Практически максимальное значение ОСШ служит в качестве выходного ( $\text{ОСШ}_{\text{вых}}$ ). Входное ОСШ ( $\text{ОСШ}_{\text{вх}}$ ) определяется по оси  $\lg H$ , учитывая, что  $1 \text{ эрг}$  на  $\lambda=600 \text{ нм}$  соответствует  $3.03 \cdot 10^{11}$  квантам, а  $1 \text{ эрг/см}^2 = 3.03 \times 10^6$  квантам, падающим на площадку  $1000 \text{ мкм}^2$ . В таблице наряду с другими данными по исследованным фотоэмульсиям представлены ОСШ и КЭД в максимуме, соответствующие им плотности над вуалью  $D_{\text{опт}}$  и величина шума  $\sigma_n$ . Максимальная величина ОСШ=123 наблюдается на неочувствленной 2415, а после очувствления ОСШ уменьшается до 87, но максимум сдвигается в сторону малых экспозиций. Максимум КЭД=1.9 % наблюдается для очувствленной 2415, причем при увеличении чувствительности в 10 раз квантовая эффективность возрастает менее чем в 5 раз.

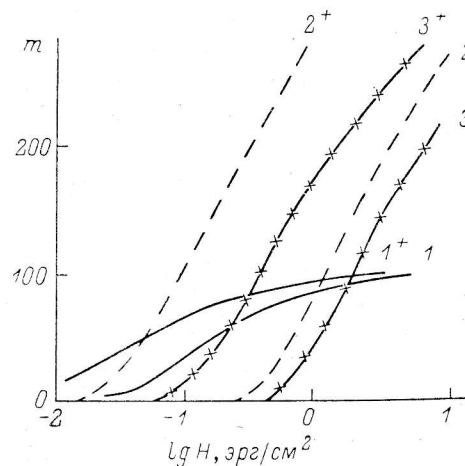


Рис. 3. Зависимость числа градаций от экспозиции до и после очувствления «+».  
1 — 103а-Ф; 2 — 2415; 3 — М-300.

Параметр	103а-Ф		2415		М-300	
	неочувств.	очувствл.	неочувствл.	очувствл.	неочувств.	очувствл.
R, лин/мм	80	—	320	—	290	—
$H_{0.85}$ , эрг/см <sup>2</sup>	0.15	0.038	2.04	0.18	3.63	0.69
$\gamma$ ( $\lambda = 600$ )	1.8	1.5	2.6	2.2	2.4	2.2
$K_{\text{очувствл}}$	—	4	—	10	—	5
$D_{\text{оптим}}$	0.7	0.8	0.5	0.6	0.5	0.6
$\sigma_D$	0.030	0.034	0.006	0.008	0.006	0.008
ОСШ <sub>макс</sub>	23	19	123	87	110	85
КЭД, %	0.13	0.35	0.4	1.9	0.13	0.5
$I$ , бит/см <sup>2</sup>	$2 \cdot 10^6$	—	$4 \cdot 10^7$	—	$3 \cdot 10^7$	—

Малая величина шума и большое разрешение фотопленок обеспечивают их высокую информативность, определяемую по формуле [8]

$$I = \int_0^N \log_2(m(x) + 1) dx, \quad (3)$$

где  $N$  — число элементов на 1 см<sup>2</sup> с площадью, равной  $x^2$ ;  $m(x)$  — число градаций для элемента площадью  $x^2$ .

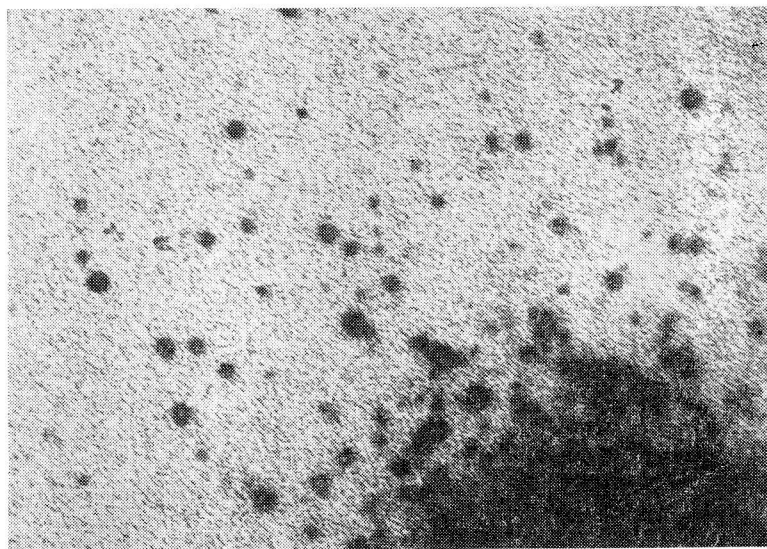


Рис. 4. Фрагмент снимка М-13 на неочувствленной 103а-Ф.  
Экспозиция 10 мин, диаметр телескопа 60 см, светосила 1/13.

Информативность возрастает с уменьшением площади элемента вплоть до размера проявленного зерна фотоэмульсии. Фотометрия методом счета проявленных зерен обеспечивает извлечение максимального количества информации из фотоизображения, но ее трудно реализовать из-за неоднозначностей, связанных со структурой фотослоя, и высоких требований к разрешению и быстродействию микрофотометра. На практике достаточно найти площадь элемента, обеспечивающего получение одной шумовой градации, что дает вероятность обнаружения объекта 67 % при гауссовом распределении амплитуд шума. Используя методику расчета информативности, разработанную Гуревичем [8], частотно-контрастные характеристики из каталогов [1, 2] и приведенные выше величины  $\sigma_D$  и  $m$ , находим, что площадь элемента равна 15 мкм<sup>2</sup> для 2415,

20 мкм<sup>2</sup> — для М-300 и более 300 мкм<sup>2</sup> — для 103а-Ф. Разрешение  $R$ , взятое из каталогов [1, 2], и информативность  $I$ , рассчитанная согласно формуле (3) до указанных выше значений минимального разрешаемого элемента, приведены в таблице. После очувствления информативность уменьшается до 1.5 раза из-за увеличения  $\sigma_s$  и некоторого снижения разрешения, но для достижения заданной величины информативности требуется меньшая экспозиция.

Микрофотометр для обработки фотоизображений без существенных потерь разрешения и фотометрической точности должен иметь разрешение вдвое больше, а шумы — в 2 раза меньше, чем фотоэмульсия. Из приведенных выше

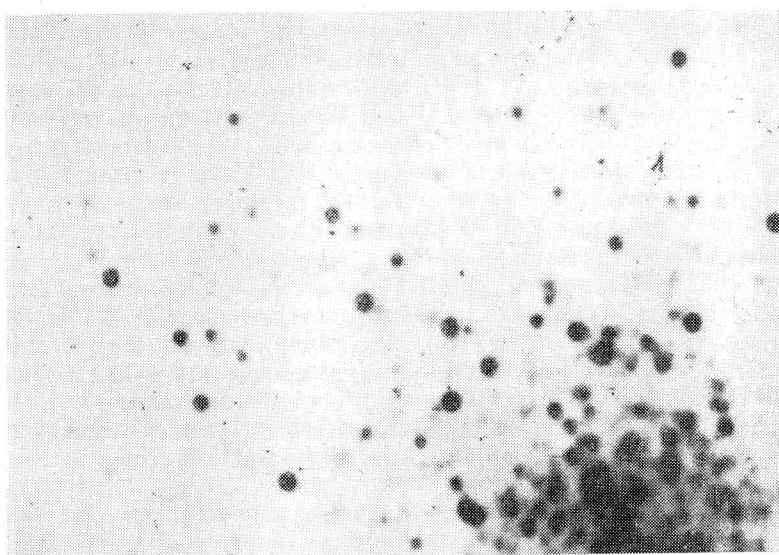


Рис. 5. Фрагмент снимка М-13 на очувствленной 2415.  
Экспозиция 10 мин, диаметр телескопа 60 см, светосила 1/13.

данных следует, что для обработки фотоизображения на фотоэмульсии 2415 размером 10×10 см требуется разрешение микрофотометра 3×3 мкм; число элементов будет более 10<sup>9</sup>, а скорость считывания должна быть не менее 10<sup>5</sup> элем/с. Собственные шумы и нестабильность микрофотометра должны быть меньше 0.002D, а число градаций — больше 1000. Если сделать шаг градаций постоянным, он должен быть меньше 0.002D, а число градаций для перекрытия диапазона до 6D — больше 3000. Необходимый объем памяти ЭВМ 10<sup>10</sup> бит, а быстродействие — 10<sup>7</sup> операций/с. Современные автоматические микрофотометры и ЭВМ еще не способны эффективно обрабатывать такие высокоинформативные фотоизображения. Информативность фотоизображений такого же размера на фотопластинках 103а-Ф на порядок меньше. Такие фотоизображения можно успешно обработать на современных автоматических микрофотометрах.

Наблюдательная проверка эффективности исследуемых фотоэмульсий проводилась на 60-см телескопе «Цейс» со светосилой 1/13. Наблюдалось шаровое скопление М-13 с экспозицией 10 мин на неочувствленных фотопластинках 103а-Ф (рис. 4), очувствленных фотоэмульсиях 2415 (рис. 5) и М-300. Сравнение рис. 4 и 5 показывает, что уровень фона на фотопластинках выше, но предельная звездная величина, с учетом ОСШ, одинаковая на обоих снимках. При получении снимка на М-300 экспозиция 10 мин оказалась недостаточной, а предел — на две звездных величины меньше, что подтверждает лабораторные данные.

#### Литература

1. Kodak Technical Pan Film 2415. Rochester, Eastman Kodak Co., 1983, P-255. 15 p.
2. Гороховский Ю. И., Баранова В. П. «Свойства черно-белых фотографических пленок. М.: Наука, 1950. 344 с.

3. Smith A. G. Comparison of the absolute sensitivity of Kodak Technical Pan Film 2415 with Standard Astronomical Emulsions. — AAS Photo-Bull., 1982, N 30. 68 p.
4. Everhart E. Hypersensitization and astronomical use of Kodak Technical Pan Film 2415. — AAS Photo-Bull., 1980, N 24, p. 3—6.
5. Тихонов Н. А. Очувствление астрофотоэмульсий в водороде. — Сообщ. САО, 1984, 40, с. 81—85.
6. Шабанов М. Ф. Стандартизация контроля астрономических фотоэмульсий с применением автоматического микрофотометра АМД-1 ЭВМ ЕС-1035. — Бюл. Абастуман. астрофиз. обс., 1985.
7. Fienlid I. Signal-to-noise of photographic emulsions. — Geneva: ESO Modern techniques in astronomical photography, 1978, p. 153—164.
8. Гуревич С. Б. Эффективность и чувствительность телевизионных систем. М.; Л.: Энергия, 1964. 277 с.

Поступила в редакцию 07.05.84