

САМЫЕ ЭФФЕКТИВНЫЕ АСТРОНОМИЧЕСКИЕ ФОТОЭМУЛЬСИИ ПОСЛЕ ОЧУВСТВЛЕНИЯ В ВОДОРОДЕ

М. Ф. Шабанов

На основе исследования более 300 образцов 15 типов астрофотоэмульсий отобрано девять самых эффективных. Для них представлены кривые спектральной чувствительности, характеристические кривые, шумы, число градаций, отношения сигнал/шум, квантовая эффективность обнаружения и информационная емкость. Благодаря применению ЭВМ многие из этих характеристик получены впервые. Рассмотрены особенности очувствления и применения фотоэмульсий для регистрации слабых и малоконтрастных объектов. Дано сравнение фотоэмульсий между собой и с лучшими панорамными светоприемниками.

Nine most effective astronomical photoemulsions are selected, basing on the investigation of more than 300 samples of 15 emulsion types. Their spectral sensitivity curves, the characteristic curves, the number of gradations, the signal-to-noise ratios, the quantum efficiency and information capacity are presented. A lot of these characteristics are obtained for the first time owing to the use of the computer. The properties of hypersensitization and the use of photoemulsions for registration of weak and weak-contrast objects are considered. A comparison of the photoemulsions with each other and with the best panoramic lightreceivers is given.

Более 30 типов астрономических фотоэмульсий изготавливается в настоящее время фирмой «Кодак» (США), ORWO (ГДР) и Казниитехфотопроектом. Количественные данные по их свойствам неполны и непригодны для выбора фотоэмульсий на наблюдения, сравнения их между собой и с другими светоприемниками и для фотометрической обработки фотоизображений на ЭВМ. Так, в справочниках фирм [1—3] обычно указываются спектральная или интегральная чувствительность для коротких экспозиций, разрешение, характеристические кривые и условия проявления. Наиболее пригодны для астронома собрание данных по фотоэмульсиям, выполненное Рожковским [4], и результаты измерений Брейдо и Михайловой [5—7]. Но и в этих работах нет данных по информационным характеристикам и не учитываются возможности очувствления. Количественно не определено, какие фотоэмульсии, в каком спектральном диапазоне и для каких экспозиций самые эффективные. Цель настоящей работы — получить полные количественные характеристики лучших астрофотоэмульсий с учетом очувствления в водороде.

Автором исследовано более 300 образцов для 15 типов фотоэмульсий по одной методике с обработкой спектросенситограмм на ЭВМ [8], обеспечивающей высокую точность и получение всех нужных характеристик. Для каждого типа фотопластинок исследовалось от 20 до 30 образцов по 5—6 поливам 1978—1982 гг., а фото пленки исследовались по 6—10 образцам 2—3 поливов 1981—1982 гг. Это позволило получить количественные средние данные по каждому типу фотоэмульсий: по спектральной чувствительности, фотометрической точности, шумам, отношению сигнал/шум (ОСШ), числу градаций, квантовой эффективности и информационной емкости. На основе этих данных отобрано девять лучших фотоэмульсий, с учетом опыта их применения в наблюдениях и многочисленных экспериментов по гиперсенсibilизации, прогревом в воздухе, азоте и водороде. Это астрономические пленки Казниитехфотопроекта: А-500У, А-550РП, А-600У, А-600РП, А-700Ф; фотопластинки Кодак: Па-0, 103а-D, 103а-F и высокоразрешающая пленка 2415. В этой группе представлены несенсибилизированные орто- и панхроматические фотоэмульсии. Фотопластинки Кодак хо-

рошо известны астрономам и взяты для сравнения, но и они уступают фотоэмульсиям: А-500Н, А-600Н, А-500РЦ, А-700У и А-700РЦ.

Экспонирование и фотометрическая обработка. Очувствленные и неочувствленные образцы фотоэмульсий экспонировались на модернизированном спектросенситометре ИСП-73 [5]. Длительность экспозиции 10 мин, спектральный диапазон — $\lambda=400\text{--}1000$ нм, диапазон освещенностей для 30 полей спектросенситограммы около 10^4 . Проявлялись спектросенситограммы в MWP-2, 9 мин при $20\text{ }^\circ\text{C}\pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$. Этот проявитель эффективен для всех типов астрономических фотоэмульсий [4, 8]. Измерялись спектросенситограммы на автоматическом микроденситометре АМД-1. Разрешаемый элемент на фотослое равен около 10×100 мкм, шаг между отсчетами 10 мкм, число отсчетов на одном поле (от $\lambda=400$ до 720 нм) 6200, а для всех 30 полей спектросенситограммы — 186×10^3 . Диапазон измеряемых плотностей от 0.01 до 5.12 с шагом 0.01.

Данные измерений обрабатывались на ЭВМ ЕС-1035. По окончании обработки каждой спектросенситограммы получался паспорт данного образца, включающий характеристические кривые, построенные через 5 нм от $\lambda=400$ нм до красной границы чувствительности; 10 кривых спектральной чувствительности для уровней плотности над вуалью от 0.03 до 2.5; шумы, ОСШ, число градаций в зависимости от плотности и энергетической освещенности. Оптические плотности и величины освещенностей редуцировались к стандартной шкале диффузных плотностей D и абсолютной шкале энергетических экспозиций H , эрг/см² (см. подробнее [8]).

Суммарная ошибка наших измерений составляет $\pm 2\%$ для спектросенситограмм, экспонированных в один день и, $\pm 8\%$ — в течение года. Ошибки измерений на АМД-1 не превышают $\pm 1\%$, а собственные шумы его — не более $\pm 0.003 D$. Обработка на ЭВМ не вносит дополнительных ошибок. Привязка к шкале энергетических освещенностей выполнялась с ошибкой $\pm 20\%$. Ошибки редукции наших измерений к стандартным шкалам не изменяют соотношения чувствительности, как и соотношения любых других характеристик образцов фотоэмульсий, поскольку все измерения выполнены в одинаковых условиях и по одной методике. Точность получения средних характеристик для каждого типа фотоэмульсий ограничивается больше всего их разбросом для отдельных образцов.

Измерения большого числа образцов каждого типа фотоэмульсий, перечисленных выше, показали, что разброс чувствительности составляет $\pm 30\%$ у фотопластинок и $\pm 50\%$ у фотоэмульсий. Разброс характеристических кривых включает разброс чувствительности и различие γ до $\pm 10\%$. Разброс величины фотографического шума от образца к образцу $\pm 20\%$. Число градаций, ОСШ, квантовая эффективность и информационная емкость связаны с уровнями плотности D и имеют такой же разброс, как характеристические кривые, но помноженный на разброс шумов. Для нескольких поливов каждого типа фотоэмульсии можно найти образцы, различающиеся по чувствительности до 1.5—2.0 раз, а по числу градаций, ОСШ и квантовой эффективности — до 2—2.5 раз.

Учитывая разброс, корректное сравнение характеристик фотоэмульсий между собой возможно лишь по осредненному, по данному большому числу образцов. Неочувствленные фотопластинки Кодак исследованы по 15—25 образцам, что обеспечило надежное получение средних характеристик с ошибкой $\pm 10\%$. Советские астрономические пленки и пленка 2415 исследованы по 5—10 образцам двух поливов 1981—1982 гг. Их средние характеристики менее точны и надежны. Особенно сложно получение средних характеристик для очувствления тех фотоэмульсий, где разброс больше. Хотя для многих фотоэмульсий исследовалось более 10 очувствленных образцов, но они часто были взяты из 2—3 поливов, и ошибки могли достигать $\pm 20\%$.

Очувствление фотоэмульсий прогревом в водороде. Лучшие результаты повышения чувствительности многих астрономических фотоэмульсий дает их прогрев в атмосфере азота, водорода или их смеси. Для этой цели совместно с М. М. Кононовым была разработана установка для очувствления прогревом в вакууме, азоте и водороде [9]. По техническим параметрам и полученным результатам эта установка является одной из лучших среди описанных в литературе. Использовался также разработанный Н. А. Тихоновым метод очув-

ствления водородом в герметичных контейнерах, пригодный для экспедиционных условий [10]. Интересно отметить, что часто при очувствлении в контейнерах при температуре 21—25 °С с вытеснением воздуха из них водородом, поступающим под давлением 1.1—1.2 атм, получаются такие же результаты, как в нашей установке с предварительной откачкой воздуха.

Использовать режимы очувствления, рекомендованные другими авторами, обычно не удается из-за различия техники, методики и свойств фотоэмульсий. Хотя каждый тип фотоэмульсий имеет свой диапазон режимов, оптимальный режим очувствления подбирается для каждой коробки фотоэмульсии экспериментально. Так, при температуре 40—50 °С и давлении водорода до 1.5 кг/см² очувствление длится несколько часов. Повышение температуры сокращает время очувствления, но часто приводит к дополнительному вуалированию. Лучшие результаты получаются в диапазоне температур от 20 до 30 °С при удлинении времени очувствления до нескольких суток. Высокочувствительные фотоэмульсии, у которых линейные участки характеристических кривых достигают $D=4.0$, очувствлялись нами до увеличения плотности вуали 0.2—0.3. Фотопленки А-500У, А-600У, А-700Ф, имеющие меньший диапазон измеряемых плотностей, очувствлялись до прироста вуали 0.15—0.20. Чувствительность восьми исследованных фотоэмульсий повышалась от 1.5 до 5 раз в зависимости от первоначальной чувствительности, условий хранения и очувствления. Чувствительность высокоразрешающей фотопленки 2415 повышалась в 6—15 раз [11].

ТАБЛИЦА 1

Параметр	А-500У	А-550РП	И а-О	А-600У	А-600РП	103а-Д	А-700Ф	103а-Р	2415
R , лин/мм	75	120	90	75	120	75	70	75	320
$H_{0.85}$, эрг/см ²	0.028	0.054	0.058	0.013	0.040	0.048	0.020	0.068	1.1
γ_{450}	1.3	2.9	1.5	1.6	3.4	1.6	1.4	1.4	2.5
L (lg H), эрг/см ²	2.0	1.4	2.3	1.3	1.3	2.1	1.2	2.4	2.0
m_{\max}	100	175	190	95	180	125	75	115	400
ОСШ _{макс}	17	37	25	19	43	19	17	16	87
КЭД	0.7	1.9	0.6	1.2	2.3	0.36	0.5	0.16	0.2
K	2.6	3.5	2.5	2.5	3.0	1.8	2.2	3.5	15
H^+ , кв/мкм ²	18	31	40	12	25	45	33	37	120
КЭД ⁺ , %	1.3	4.4	1.7	2.1	4.6	0.6	0.9	0.4	2.0
$A_{эл}$, мкм ²	240	70	200	230	65	260	280	250	15
I , бит/см ²	2.3	7.8	3.0	2.0	9	2.2	1.8	2.1	30

Примечание. Данные получены при $T_{\text{эксп}} = 10$ мин, проявлены в MWP-2, 9 мин, 20 °С, для элемента $A_{эл} = 1000$ мкм², на $\lambda = 450$ нм.

R — разрешение, взято из работ [1, 2, 5, 6]; $H_{0.85}$ — энергетическая экспозиция для получения $D = 0.85$ над вуалью; γ_{450} — коэффициент контрастности для $\lambda = 450$ нм; L — фотометрируемый диапазон экспозиций в логарифмической шкале; m_{\max} — максимальное число градаций; ОСШ_{макс} — максимальное значение отношения сигнал/шум; КЭД, КЭД⁺ — квантовая эффективность обнаружения для неочувствленных и очувствленных фотоэмульсий; K — коэффициент увеличения чувствительности при очувствлении в водороде; H^+ , I — экспозиция для получения ОСШ_{макс} в квантах на 1 мкм²; $A_{эл}$ — площадь элемента, позволяющая получить $m = 1$; I — информационная емкость, бит/см², уменьшенная в 10^6 раз.

Уменьшается коэффициент контраста в среднем на 10—15 %, укорачивается прямолинейный участок и удлиняются начальные нелинейные участки характеристических кривых.

В табл. 1 приведены средние значения коэффициента увеличения чувствительности всех девяти фотоэмульсий, измеряемые по уровню $D=0.85$ над вуалью для экспозиции 10 мин, $\lambda=450$ нм. Минимальное повышение чувствительности в 1.8 раза наблюдается у фотопластинок 103а-Д. Возможно, для них и для некоторых других фотоэмульсий режимы были не самыми оптимальными или исследованные образцы плохо очувствлялись. При часовых экспозициях коэффициент очувствления возрастает до 1.5 раза, так как очувствление сильно уменьшает невзаимозаменяемость. В целом приведенные в табл. 1 результаты близки к тем, что получены в работах [10, 12, 13], если учесть различие условий очувствления и прироста вуали. Чувствительность можно еще повысить в 1.5—2.0 раза за счет предельного очувствления в водороде или использования импульсной подсветки. Однако с повышением чувствительности возрастают микро- и макрошумы, уменьшается отношение сигнал/шум и число градаций, возможно и изменение чувствительности во время длительной экспозиции. По этим причинам в табл. 1 приведены не предельные, а средние значения коэф-

коэффициента очувствления, которые нетрудно достичь и успешно использовать в наблюдениях.

Кривые спектральной чувствительности. Средние кривые спектральной чувствительности для уровня $D=0.85$ над вуалью для неочувствленных эмульсий представлены на рис. 1. Благодаря абсолютной калибровке по ним нетрудно найти соотношение чувствительности всех эмульсий для разных λ , но оно меняется в зависимости от уровня D над вуалью, по которому строится кривая спектральной чувствительности. С уменьшением D все больше сказывается преимущество высокочувствительных фотоэмульсий, имеющих меньший контраст и более протяженный начальный участок характеристических кривых. Наоборот, для D более 1.0 преимущество имеют фотоэмульсии с большими γ . Так, для $D=0.2$ самая чувствительная фотоэмульсия — А-600У, а для $D=2.0$ — А-600РП.

Выдаваемые в паспорте фотоэмульсии 10 кривых спектральной чувствительности для D от 0.03 до 2.5 дают полную характеристику спектральной чувствительности каждой фотоэмульсии.

Каждая фотоэмульсия имеет свои характерные подъемы и спады чувствительности в зависимости от λ (рис. 1). Резкий спад чувствительности начинается на $\lambda=470$ нм для А-500У, 490 нм — Па-О, 500 нм — А-550РП, 580 нм — А-600У, А-600РП, 625 нм — 103а-Д и 685 нм — 103а-Ф, А-700Ф, 2415. Крутизна спада чувствительности различается до трех раз. Так, чувствительность уменьшается в 100 раз на спектральном интервале 20 нм для А-700Ф и 60 нм — для А-600У.

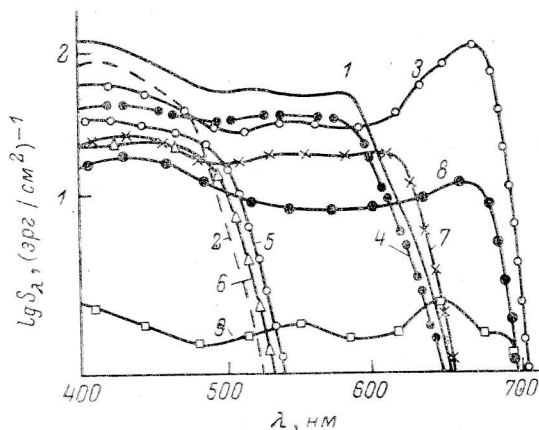


Рис. 1. Кривые спектральной чувствительности. 1 — А-600У; 2 — А-500У; 3 — А-700Ф; 4 — А-600РП; 5 — А-550РП; 6 — Па-О; 7 — 103а-Д; 8 — 103а-Ф; 9 — 2415.

Это существенно для определения полосы пропускания фотометрических систем, опирающихся на длинноволновую спад чувствительности. Поскольку ортохроматические и панхроматические фотоэмульсии имеют высокую чувствительность в синей части спектра, целесообразно регистрировать на одну фотоэмульсию весь спектральный диапазон или все полосы многоцветной фотометрической системы, разделив их оптическими фильтрами. С одной фотоэмульсией проще работать при очувствлении и в наблюдениях, легче обеспечить надежную фотометрическую калибровку и точнее вести фотометрическую обработку на ЭВМ с подавлением шумов. Удобны для этого фотоэмульсии с малыми изменениями чувствительности по спектру, такие как А-700Ф и 103а-Ф.

Кривые спектральной чувствительности после очувствления сдвигаются вверх по оси $\lg S_\lambda$ пропорционально коэффициенту очувствления K из табл. 1. Однако K обычно растет с увеличением λ , и соответственно поднимаются длинноволновые части кривых спектральной чувствительности. Зависимость K от λ различна для разных фотоэмульсий и детально нами не изучалась.

Характеристические кривые. Средние характеристические кривые на $\lambda=450$ нм девяти отобранных фотоэмульсий без очувствления представлены на рис. 2. Все кривые приведены к нулевому уровню D за счет вычитания плотности вуали. Плотность вуали в пределах $D_v=0.1 \div 0.4$ не влияет существенно на характеристические кривые. Они как бы поднимаются на величину D_v , не сдвигаясь по оси $\lg H$ и не меняя форму, кроме небольших изменений на начальных участках. Характеристические кривые на рис. 2 наглядно отражают различие фотоэмульсий по диапазону регистрируемых плотностей, экспозиций и коэффициенту контраста. Пять фотоэмульсий имеют диапазон регистрируемых плотностей более 5.0, а линейные участки их характеристических кривых достигают $D=4.0$. Это обеспечивает большой фотометрируемый диапазон экспозиций L , где соблюдается линейная или близкая к линейной зависимость D от $\lg H$. Недостатком самых чувствительных фотоэмульсий А-600У

и А-700Ф является малый регистрируемый диапазон плотностей. Загиб характеристических кривых, связанный с соляризацией, начинается на $D \approx 1.5$ для А-700Ф и $D \approx 2.0$ для А-600У (рис. 2). Эти эмульсии имеют минимальный фотометрируемый диапазон при малых контрастах $\gamma = 1.2 \div 1.4$ для А-700Ф и $\gamma = 1.3 \div 1.6$ — для А-600У. Максимальный фотометрируемый диапазон L у 103а-Ф — 2.4, затем следуют Па-О — 2.3, 103а-Д — 2.1 и т. д. (табл. 1). Астроплёнки А-600РП и А-550РП имеют $L = 1.3 \div 1.4$, но высокий коэффициент контраста, что обеспечивает эффективную регистрацию слабоконтрастных объектов. Величины γ , L и экспозиции, необходимые для получения $D = 0.85$ над вуалью для $\lambda = 450$ нм, приведены в табл. 1. Полное сравнение характеристических кривых фотоэмульсий возможно по их паспортам, где они построены через 5 нм, но описание столь громоздкого материала невозможно в рамках этой статьи.

Самая чувствительная фотоэмульсия на $\lambda = 450$ нм — А-600У. За нею следуют А-500У, А-700Ф, А-600РП. Среднее различие чувствительности А-600У и А-500У меньше, чем разброс чувствительности для отдельных образцов этих эмульсий. По этой причине самые высокочувствительные образцы А-500У могут иметь одинаковую или даже большую чувствительность, чем малочувствительные образцы А-600У. Это возможно и для фотоэмульсий А-600РП, А-550РП, 103а-Д, Па-О и 103а-Ф, которые различаются по чувствительности в среднем не более чем в 1.5 раза, а разброс чувствительности для отдельных образцов этих эмульсий достигает 2 раз. Различие чувствительности после очувствления уменьшается. Особенно это заметно по фотоэмульсии 2415, которая очувствляется в 12 раз и сравнивается по чувствительности с неочувствленной 103а-Ф. После очувствления заметно меняется форма характеристических кривых.

Шумы, число градаций, ОСИ, квантовая эффективность и информационная емкость. Шумы σD и число градаций с шагом в одно значение шума измерялись для равномерно засвеченных полей [14] по методике, описанной в [8]. Измерения сделаны для площади элемента $A = 1000$ мкм², но при $\sigma D \leq 0.02$ (двух дискретов АМД-1), дополнительно проводились измерения для $A = 100$ мкм². Величина σD практически не зависит от λ в диапазоне от 400 до 700 нм. Зависимость σD и m от D представлена в табл. 2 для всех девяти фотоэмульсий. Согласно структурометрическому анализу [15], величина σD растет пропорционально \sqrt{D} , что подтверждается и нашими измерениями. Относительная ошибка измерений $\sigma D/D$ уменьшается от 10 до 1.8 % с ростом D от 0.2 до 4.0 у фотоэмульсии 103а-Ф, обладающих максимальной величиной шума, и от 2 до 0.5 % — у фотоэмульсии 2415. Число градаций соответственно растет от 15 до 105 у 103а-Ф и от 52 до 355 у 2415.

Динамический диапазон, определяемый по числу градаций $m_{\text{макс}}$, для полной экспозиции до загиба характеристической кривой составляет 115 для 103а-Ф и 400 для 2415. Величины $m_{\text{макс}}$ для всех исследованных фотоэмульсий приведены в табл. 2.

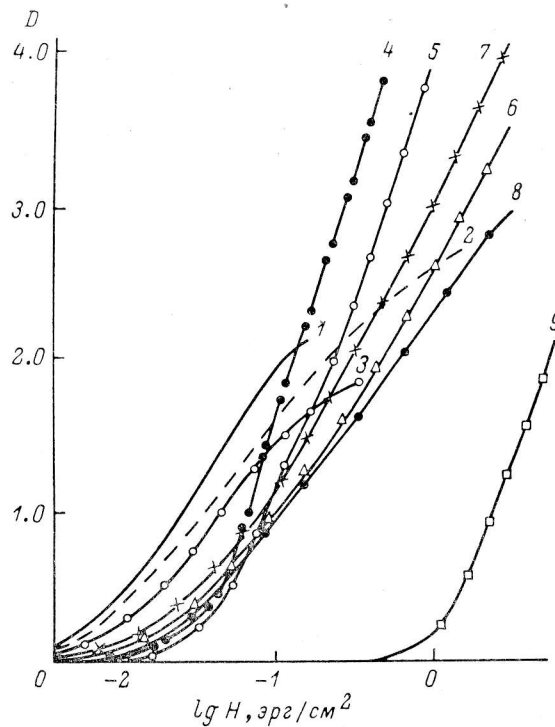


Рис. 2. Характеристические кривые.
Условные обозначения см. на рис. 1.

ТАБЛИЦА 2

Тип эмульсии	Диффузная плотность											
	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
A-500У	15	21	23	27	31	35	39	46	52	56	—	—
	20	33	46	56	64	70	81	96	107	116	—	—
A-550РП	11	16	19	23	26	29	35	43	49	53	57	60
	26	44	56	70	83	93	102	115	125	133	142	151
Па-О	10	14	16	19	21	23	25	29	33	37	40	43
	27	46	59	75	85	94	113	130	145	158	170	180
A-600У	16	21	24	28	32	35	39	45	51	55	—	—
	19	32	45	54	62	68	79	94	106	115	—	—
A-600РП	11	16	20	24	26	29	36	43	49	53	58	61
	26	44	56	70	82	92	101	114	124	132	141	150
103а-D	18	22	26	30	33	36	41	46	52	57	62	65
	17	28	38	46	53	59	70	80	89	97	104	110
A-700Ф	16	22	25	29	33	36	40	47	53	57	—	—
	18	31	43	52	60	65	76	91	102	110	—	—
103а-F	19	23	28	32	35	38	43	49	55	61	65	70
	15	26	35	43	49	56	67	77	85	92	98	105
2415	4	6	8	10	12	13	14	16	17	18	19	20
	52	94	126	150	168	185	108	240	272	302	330	355

Примечание. Для каждой эмульсии указаны: в первой строке — увеличенная в 1000 раз величина шума σD для элемента площадью 1000 мкм², во второй строке — число градаций с шагом в одно значение шума.

Фотоэмульсии A-500У, A-600У, A-700Ф, 103а-D и 103а-F имеют средние различия шумов и числа градаций меньше, чем разброс этих характеристик. Отдельные образцы этих эмульсий могут иметь одинаковые шумовые и градационные характеристики. Обычно наблюдается четкое соответствие между визуально оцениваемой зернистостью и измеряемой величиной σD . Но фотоэмульсии A-550РП и A-600РП имеют более мелкое зерно и лучшее разрешение, чем фотоэмульсии Па-О, а величина шума у фотоэмульсий больше (табл. 2). Это объясняется большим вкладом крупномасштабных шумов, отражающих неоднородности фотослоев пленок A-550РП и A-600РП. За счет улучшения технологии полива этих фотоэмульсий есть возможность сделать их шумы меньше, а относительную точность фотометрии лучшей, чем на фотоэмульсиях Па-О. У всех фотоэмульсий шумы растут с ростом чувствительности при оцувствлении. Они увеличиваются на 10—20 % для умеренных коэффициентов оцувствления в водоруде, приведенных в табл. 2.

Отношение сигнал / шум и квантовая эффективность детектирования (КЭД или DQE) определялись по формулам, описанным в [11]. Максимальная величина ОСШ (ОСШ_{макс}) приведена в табл. 1 для неочувствленных фотоэмульсий на $\lambda=450$ нм для площади элемента 1000 мкм². Она наблюдается в начале прямолинейного участка характеристических кривых для $D=0.5 \div 0.6$ над вуалью у фотоэмульсии 2415, $D=0.6 \div 0.7$ для A-550РП, A-600РП и $D=0.7 \div 0.8$ для остальных фотоэмульсий. Минимальную величину ОСШ=16 имеют фотоэмульсии 103а-F, а максимальную ОСШ=87 — фотоэмульсия 2415. После оцувствления, описанного выше, величина ОСШ уменьшается на 20—30 % за счет увеличения σ_n и уменьшения коэффициента контраста. Благодаря подробному паспорту фотоэмульсии, получаемому нами на ЭВМ, нетрудно вычислить величины ОСШ для всех нужных λ и экспозиций. В частности, в работе [11] нами представлены величины ОСШ и КЭД на $\lambda=600$ нм для фотоэмульсий 103а-F, Микрат-300 и 2415 с учетом оцувствления.

В табл. 1 приведены величины КЭД в максимуме для неочувствленных и оцувствленных фотоэмульсий на $\lambda=450$ нм. Описанное выше ОСШ_{макс} служило в качестве выходного отношения сигнал / шум, а входное ОСШ находилось по оси $\lg H$. При этом учитывалось, что экспозиции в 1 эрг/см² соответствует

$2.27 \cdot 10^6$ квантов на 1000 мкм^2 на $\lambda=450 \text{ нм}$. Представлены также энергетические экспозиции в квантах на квадратный микрометр, необходимые для достижения максимального КЭД на очувствленных фотоэмульсиях. Лучшей по квантовой эффективности является фотоэмульсия А-600РП, КЭД=2.3 до и 4.6 % после очувствления. За ней следуют фотоэмульсии А-550РП, соответственно КЭД=1.9 и 4.4 %, А-600У — КЭД=1.2 и 2.1 %. Фотоэмульсия А-600У, как самая высокочувствительная, имеет минимальный порог обнаружения и экспозицию 12 кв/мкм^2 для достижения максимума КЭД. Очувствленная фотоэмульсия 2415 имеет КЭД=2.0 % при экспозиции 120 кв/мкм^2 . У очувствленных фотоэмульсий КЭД растет в 1.5—1.7 раза меньше, чем чувствительность, что связано с упомянутым выше уменьшением ОСШ при очувствлении.

Величины шумов, измеренные нами, в 1.4—1.8 раз меньше, чем представленные в работах [5, 6, 16]. По этой причине в нашей работе ОСШ в 1.5—1.7 раза

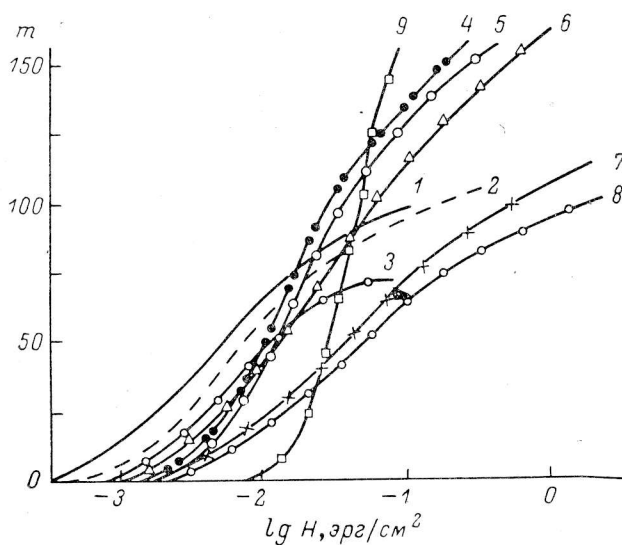


Рис. 3. Зависимость числа градаций от энергетической экспозиции. Условные обозначения см. на рис. 1.

больше, а квантовая эффективность больше в 2—3 раза. Некоторые причины различий в измеряемых величинах шумов отмечены автором в [17]. К сожалению, в [5, 6] и частично в [16] четко не указаны число измеряемых образцов, условия, алгоритм и ошибки измерений, что затрудняет количественное сравнение. Данные по ОСШ есть лишь для нескольких фотоэмульсий (из нашего списка только для Па-О [16]), а данные по КЭД практически не с чем сравнивать.

Эффективность фотоэмульсий. Естественно считать более эффективным светоприемник, обеспечивающий получение большого количества информации о наблюдаемом объекте в заданных условиях наблюдений. Используя данные табл. 1, 2 и характеристические кривые рис. 2 на $\lambda=450 \text{ нм}$, нетрудно оценить фотометрическую точность и количество информации для заданных условий наблюдений. Кривые спектральной чувствительности (рис. 1) позволяют распространить эти оценки на все нужные λ . Наглядную характеристику эффективности фотоэмульсий дает зависимость числа градаций с шагом в одно значение шума от $\lg H$, представленная на рис. 3, для очувствленных фотоэмульсий на $\lambda=450 \text{ нм}$, при площади элемента 1000 мкм^2 . По зависимости m от $\lg H$ графически определяется оптимальный диапазон экспозиций, динамический диапазон по числу градаций, точность фотометрии, ОСШ, КЭД и вероятность обнаружения объекта с заданным перепадом яркости для любой экспозиции [11].

Кривые рис. 3 показывают, что для экспозиций от $3 \cdot 10^{-4}$ до $3 \cdot 10^{-3} \text{ эрг/см}^2$ фотоэмульсия А-600У не имеет конкурентов. Фотоэмульсия А-500У уступает ей в среднем в 1.5 раза. В диапазоне от $3 \cdot 10^{-3}$ до $4 \cdot 10^{-2} \text{ эрг/см}^2$ лучшей является фотоэмульсия А-600РП. Фотоэмульсия А-550РП близка к ней по чувствительности и шумам. Высокорастворяющая фотоэмульсия 2415 является лучшей в диапазоне H

от $4 \cdot 10^{-2}$ до 0.1 эрг/см². Неочувствительные фотопленки А-600РП и А-500РП эффективны в диапазоне от 0.02 до 0.2 эрг/см², а чувствительная фотоэмульсия Па-О — от 0.003 до 1 эрг/см². Для экспозиций более чем 1 эрг/см², самой эффективной становится неочувствительная фотопленка 2415. Преимущество ее особенно заметно при регистрации мелкомасштабных изображений, получаемых на светосильных короткофокусных телескопах, где другие фотоэмульсии теряют эффективность в соответствии с их частотно-контрастными характеристиками.

Зависимость числа градаций от энергетической освещенности удобна и для сравнения фотоэмульсий с другими светоприемниками, но таких данных для них нет. Для лучших панорамных светоприемников, которыми являются ПЗС-матрицы, обычно известны ОСШ и КЭД. По сравнению с фотоэмульсиями они имеют следующие преимущества: КЭД достигает 70 %, ОСШ растет линейно с ростом H , достигая нескольких тысяч [18]; порог регистрации составляет десятки квантов на разрешаемый элемент, а у фотоэмульсий — сотни квантов; возможен контроль процесса накопления информации и обработки ее на ЭВМ в процессе регистрации. Но число разрешаемых элементов у ПЗС-матриц обычно не превышает 10^6 . Фотоэмульсии превосходят их по разрешению и по числу разрешаемых элементов в 100 — 1000 раз благодаря отсутствию ограничения на формат регистрируемых изображений. При регистрации астрономических изображений размером до 30×30 см с разрешением до 2 — 3 мкм фотоэмульсии еще длительное время останутся непревзойденными. Быстрое развитие обработки фотоизображений на ЭВМ в недалеком будущем позволит оперативно обрабатывать такие изображения. Важными преимуществами является простота и надежность использования в наблюдениях, возможность длительного хранения зарегистрированной информации. Существенно, что потенциальные возможности повышения чувствительности у фотографии далеко не исчерпаны.

Автор благодарен техникам фотолаборатории БТА и операторам АМД-1 и ЕС-1035 за помощь в получении и обработке спектросенситограмм, Н. А. Тихонову — за ценные замечания.

Литература

1. Kodak Plates and Films for Scientific Photography. Rochester, East. Kodak Co. Catalogue, 1973, P-315. 35 p.
2. Kodak Technical Pan Film 2415. Rochester, East. Kodak Co. Catalogue, 1983, p-255, 15 p.
3. Фотоматериалы для науки и техники. Каталог. Йена: ORWO, 1975.
4. Рожковский Д. А. Высокочувствительные фотоматериалы для астрономических целей. Обработка их в фотолаборатории, применение для фотометрии. — Тр. Астрофиз. ин-та, Алма-Ата, 1975, 25, с. 38—75.
5. Брейдо И. И., Михайлова О. М. Результаты лабораторных испытаний фотопластинок фирмы Кодак. — Астрон. циркуляр, 1975, № 872, с. 6—8.
6. Брейдо И. И., Михайлова О. М. Исследование фотопластинок Па-1, отличающихся большим отношением сигнал / шум. — Астрон. журн., 1975, 52, с. 415—419.
7. Брейдо И. И., Михайлова О. М. Фотографирование предельно слабых искусственных звезд на различных фотографических материалах. — ЖНПФик, 1975, 20, с. 113—121.
8. Шабанов М. Ф. Стандартизация контроля астрономических фотоэмульсий с применением автоматического микрофотометра АМД-1 и ЕС-1035. — Бюл. Абастуман. астрофиз. obs., 1985.
9. Кононов М. М., Шабанов М. Ф. Новая установка для гиперсенсibilизации астрофотоэмульсий прогревом в вакууме, азоте и водороде. — Сообщ. САО, 1984, 40, с. 53—58.
10. Тихонов Н. А. Водородное очувствление фотоэмульсий в экспедиции. — Сообщ. САО, 1983, 39, с. 40—43.
11. Тихонов Н. А., Шабанов М. Ф. Эффективность высоко разрешающих фотопленок М-300 и 2415 после очувствления в водороде. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1985, 22, с. 89—94.
12. Натрашвили В. В. Результаты водородной гиперсенсibilизации астрономических фотоэмульсий. — Сообщ. САО, 1984, 40, с. 69—72.
13. Тихонов Н. А. Результаты гиперсенсibilизации в водороде астроплёнок Казни-техфотопроекта. — Сообщ. САО, 40, с. 81—85.
14. Шабанов М. Ф. Результаты измерений микрошумов астрофотоэмульсий Кодак, ORWO и Казнитехфотопроекта. — Сообщ. САО, 1984, 40, с. 73—79.

15. Вендровский К. В., Вейцман А. И. Фотографическая структурометрия. М.: Искусство, 1982. 152 с.
16. Furenli d I. Signal-to-noise of photographic Emulsions. — Modern Techn. in Astron. Photogr., ESO, 1978, p. 153—164.
17. Шабанов М. Ф. Сравнение фотоэмульсий фирмы Кодак: 103а-О, IIа-О, IIIа-Ж, фирмы ORWO ZU-21 и Казнитехфотопроекта: А-500У, А-500Н, А-500РП, А-550РП поливов 1978—1982 гг. — Бюл. Абастуманской астрофиз. обс., 1985.
18. Kristian J., Blonke M. Charge-coupled device in astronomy. — Aci. Amer., 1982, 247, N 4, p. 48--56.

Поступила в редакцию 07.05.84
