

ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ ПЛАСТИНОК ПУТЕМ ДЛИТЕЛЬНОГО НАГРЕВА

О. Зихова, Й. Зиха, Я. Гонса

Описаны результаты повышения чувствительности спектроскопических пластинок фирмы «Кодак», США, применяемых на двухметровом телескопе в Отделе изучения звезд Астрономического института АН ЧССР в Ондржейове. Спектроскопические пластинки нагреваются еще до начала экспозиции при разных температурах и разной продолжительности нагрева в зависимости от вида эмульсии. Нагревая пластинки в воздушной среде, получаем — по сравнению со стандартными параметрами — повышение чувствительности в среднем в два раза, в азотной среде даже в три раза и больше. Описана установка для длительного нагрева пластинок.

Our 2-m telescope is used almost exclusively for high-dispersion spectroscopy in coudé focus. As the observation time of giant telescopes is very expensive, we try to increase the efficiency of the whole process of getting information through the exposure time reduction by application of hypersensitization methods, especially by baking. The universal device for baking of spectroscopic plates in dry air, in nitrogen, in various inert gases or in vacuum is described. The sensitivity of the emulsion on average doubles by air baking and triples by nitrogen baking.

1. Закон взаимозаменяемости и отклонения от него. Экспозиция определена согласно чехословацкому стандарту ЧСН 66 6401 [1] по формуле

$$H = \int_0^t E dt,$$

где H — экспозиция, лк·с; E — освещенность, лк; t — время освещения, с.

В условиях непродолжительной экспозиции и постоянства освещенности во время экспозиции действует с достаточной точностью закон взаимозаменяемости

$$H = Et, \quad (2)$$

но стоит только увеличить длительность экспозиции — и формула (2) перестает выполняться [2, 3]. Реальные условия процесса можно выразить формулой

$$H = H(E). \quad (3)$$

В системе координат $(\log E, \log H)$ функциональная зависимость (3), характерная для данной эмульсии, плотности, условий проявления и других параметров, изображается кривой (изопакой) с нерезким минимумом, определяющим рабочую область, в которой эмульсия использует полученную энергию с наивысшим коэффициентом.

Изопаки получаем путем анализа сенситометрических характеристик (характеристических кривых), которые выражают реакцию эмульсии на полученную энергию по формуле

$$D = D(H), \quad (4)$$

где D — плотность.

Примером получаемых сенситометрических характеристик у нормальной эмульсии и эмульсии ПаО с повышенной чувствительностью может служить рис. 1. Буквой *u* (от английского unbacked) обозначены пластинки, которые не подвергались нагреву, буквой *b* (backed) — пластинки, обработанные в термостате. Индексы означают продолжительность экспозиции (600 или 7200 с); она возрастает, а освещенность ослабляется. Обычно контролируется фактор нарастания чувствительности на уровне $D=0.6$ над вуалью. Очевидно, что нарастание чувствительности прямо проявится посредством более кратковременной экспозиции, нужной для получения требуемой плотности.

Сравнив факторы $x=0.355 = \log 2.226$ и $w=0.45 = \log 2.82$, видим, что большего нарастания удастся достичь как раз у продолжительных экспозиций с малым освещением, где повышение чувствительности особенно желательно.

На рисунках экспозиция H и освещенность E приведены в относительных величинах.

На основании данных, изображенных на рис. 1, можно получить четыре точки для изопака, изображенных на рис. 2. Изопака идеальной эмульсии, для которой действителен закон взаимозаместимости, изображена прямой C . Чтобы получить нужную плотность, надо только сохранить постоянство произведения Et . Изопака нечувствительной эмульсии

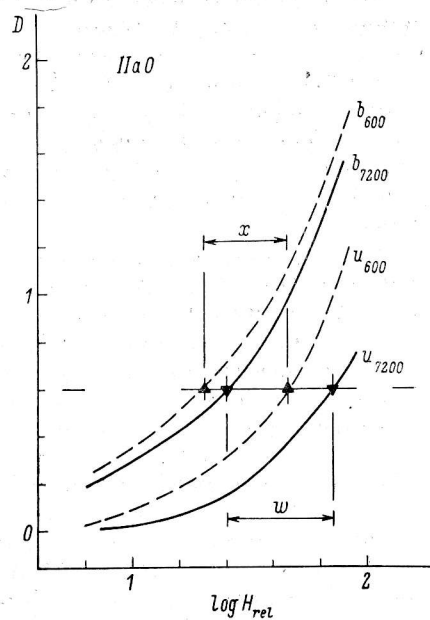


Рис. 1. Сенситометрические характеристики пластинок ПаО.

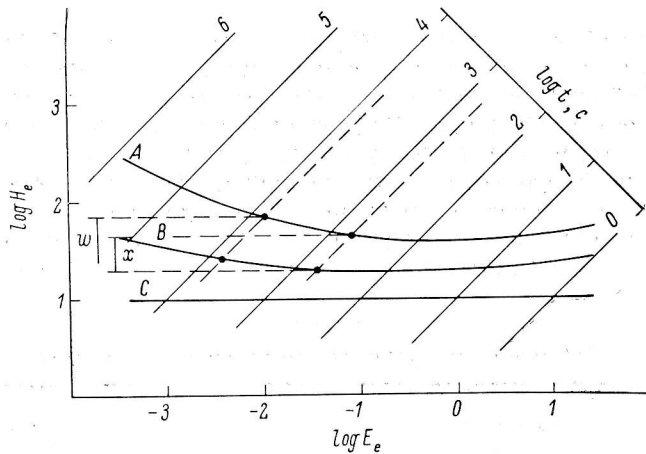


Рис. 2. Ход изопака для пластинок типа ПаО.

изображена кривой A , из которой ясно, что в целях достижения желаемой плотности нужна для малой освещенности увеличенная экспозиция. Нагрев проявится посредством передвижения изопаки вниз (кривая B), кривая выравнивается и минимум передвигается по направлению к величинам менее интенсивной освещенности E . Для получения данной плотности достаточно менее продолжительной экспозиции, чем у кривой A .

Фактор прироста чувствительности для данной продолжительности экспозиции определен отношением A_A/H_B .

Построение изопак — очень трудоемкая операция, потому что каждую точку надо определить по отдельной сенситометрической характеристике. В целях изображения четырех обозначенных точек были использованы величины из рис. 1. Кривые служат, скорее, в качестве иллюстрации, потому что кроме этих точек были при построении кривых использованы данные из литературы [4]. Для целей астрономии желательно перенести минимум изопак по направлению к малым величинам освещенности E , так как большое отклонение от закона взаимозаместимости не позволяет получить хороших результатов. Для слабо светящихся объектов время экспозиции, которая сама по себе продолжительна, надо растягивать еще больше.

Фирма «Кодак» уже в процессе производства подавляет у спектроскопических эмульсий, употребляемых в астрономии, до определенной степени отклонения от закона взаимозаместимости и обозначает эти эмульсии буквой «а», например ПaO, ШaJ, 103aF и т. д. Дальнейшее уменьшение исследуемых отклонений является уже задачей потребителей и достигается при помощи самых различных методов. Эффект, который от этого получают, безусловно, вещь важная, особенно для продолжительных экспозиций, в чем можно убедиться, посмотрев рис. 1 и 2.

2. Методы повышения чувствительности. Методов повышения чувствительности фотографических материалов существует очень много, но в астрономии оправдали себя лишь некоторые.

Литературы, посвященной повышению чувствительности фотоматериалов, сравнительно мало. Хороший перечень таких работ приведен в рекламных материалах фирмы «Кодак» [4] или в журналах [5—7]. Доклады на эту тему прочитаны тоже на конгрессе IAU, состоявшемся в 1976 г. [8], и на фотографической конференции в Женеве в 1978 г. [9]. Кроме того, надо учесть, что методов измерений и критериев повышения чувствительности существует такое множество, что их число приблизительно равно числу авторов, разрабатывающих эту проблему. Поэтому внедрение или повторение отдельных экспериментов дается сравнительно трудно.

На конечный фотографический эффект влияет целый ряд факторов, например способ хранения и условия экспозиции, способ проявления, степень созревания эмульсии, ее чувствительность, содержание кислорода, да и воды в ней и т. д. Физическими или химическими процессами можно существенно повлиять на три последних фактора.

В нашем институте проводились эксперименты, смыслом которых было изучение влияния нагрева, предварительной экспозиции и погружения в раствор. Поскольку преимущественная часть спектрограмм у двухметрового телескопа экспонируется в коротковолновом диапазоне спектра,

ТАБЛИЦА 1
Пластинки, гиперсенсibilизированные в воздухе

Сорт эмульсии	Спектральный диапазон, нм	Примечание
ПaO	250—500	Средняя чувствительность, среднее зерно, применяется в большинстве случаев
103aO	250—500	Довольно чувствительная, грубоватое зерно
ШaJ	250—550, особенно выгодна для 450—550	Малочувствительная, очень мелкое зерно
ПaD	250—640, особенно выгодна для 460—625	Малочувствительная, мелкое зерно

а метод является сравнительно простым и выгодным с точки зрения хорошей репродукции полученных результатов, мы приступили к реализации метода повышения чувствительности путем длительного нагрева.

3. Нагрев в воздушной среде. С помощью нагрева в воздушной среде с 1968 г. проводится обработка эмульсий, которые приведены в табл. 1. Чувствительность повысилась в среднем в два раза, что соответствует и повышению эффективности телескопа в два раза. Важно то, что нагрев не влияет на величину зерна, и плотность вуали повышается лишь совсем мало и равномерно на всей поверхности пластинки. Получаемый эффект, по-видимому, возникает благодаря искусственному ускорению старения эмульсии и удаления из нее кислорода и воды. Понижение чувствительности влиянием кислорода и воды в определенных условиях было уже доказано [10—12].

После многих экспериментов при температуре нагрева от 50 до 72° С и продолжительности нагрева от 6 до 96 ч были установлены следующие оптимальные условия:

- для видов ПаО, 103аО и ШАJ — 6 ч, 65° С;
- для видов ПаD и 103аF — 24 ч, 50° С.

Повышение температуры и продолжительности нагрева способствует нежелательному возрастанию плотности вуали.

Спектроскопические пластинки обычно хранят в холодильнике, и поэтому их надо сначала в течение 4 ч согреть так, чтобы предотвратить конденсацию воды на их поверхности и возможную ретикуляцию эмульсии. Потом пластинки кладут в лабораторный термостат эмульсией вверх, включают нагревательные элементы с автоматической регулировкой температуры и на временном выключателе настраивают время нагрева. Циркуляцию воздуха обеспечивает специальный вентилятор, водяные пары поглощает силикагель, помещенный в сосудике на дне термостата.

После окончания всей операции пластинки остывают и потом или целиком, или разрезав на нужный размер, их помещают обратно в холодильник. У одного или двух образцов из каждой пластинки проводят сенситометрический контроль полученного повышения чувствительности. Пример результатов в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2
Результаты повышения чувствительности путем нагрева
в воздушной среде

Сорт эмульсии	Условия нагрева, °С/ч	Повышение чувствительности (время экспозиции 60 мин)	Плотность вуали	
			нормальная	после нагрева
ПаО	65/6	1.7—2.1	0.11	0.20
103аО	65/6	1.7—1.8	0.10	0.20
ШАJ	50/12	1.9	0.08	0.10
ШАJ	65/6	3.0	0.08	0.22
ШАJ	65/12	4.8	0.08	0.42
ПаD	50/24	1.5	0.20	0.30

Эффект, полученный в результате повышения чувствительности, проверяется по тем же принципам, по каким проводят и измеряют калибровку настоящих спектрограмм. Переходить от экспериментов к привычной работе в таком случае просто, и не надо применять какие-нибудь коррективы. Спектрофотометрическую калибровку получают путем экспозиции равномерно освещенного шестиступенчатого серого клина, поставленного на входной щели спектрографа. Измерение калибровки даст нам шесть точек характеристической кривой эмульсии для выбранной волны. Плотность этих точек измеряется с помощью регистрирующего

микрофотометра. Ориентироваться в спектрограмме возможно с помощью спектра сравнения из железной дуги или газоразрядной лампы. Сенситометрическая характеристика ненагреваемой эмульсии служит в качестве основы для сравнения сенситометрических характеристик образцов с повышенной чувствительностью. Из сравнения экспозиций, необходимых для получения данной плотности (в нашем случае $D=0.6$ над вуалью), определяется относительное повышение чувствительности.

В идентичных условиях экспонируем образцы пластинок с нормальной эмульсией и образцы с повышенной чувствительностью, которые по-

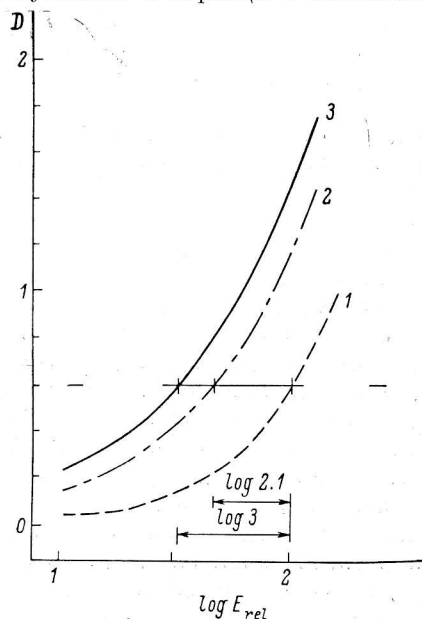


Рис. 3. Пример результатов повышения чувствительности пластинок IIaO.

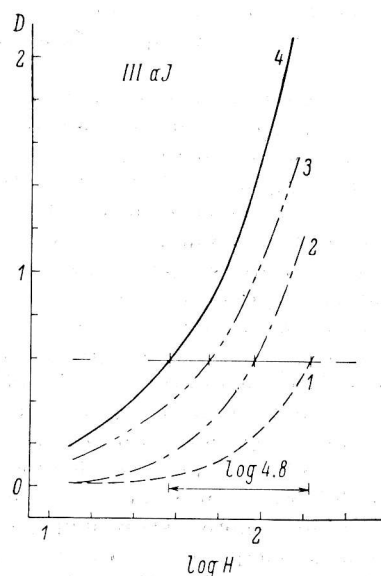


Рис. 4. Пример результатов повышения чувствительности пластинок IIIaJ.

том одновременно проявляем в автоматическом приспособлении, содержащем проявитель MWP-2, температура 20°C , время 9 мин. Чтобы проконтролировать, до какой степени удалось сократить отклонения от закона взаимозаменяемости, рекомендуется проявить одну пару (т. е. пластинку с нормальной эмульсией и пластинку с повышенной чувствительностью) в условиях непродолжительной экспозиции, например 10 мин и одну пару пластинок, которые экспонировались долго, например 120 или 180 мин (рис. 1). Пример полученных сенситометрических характеристик для эмульсий IIaO и IIIaJ показан на рис. 3 и 4, описание которых дано далее.

Надо учесть, что эффект, достигаемый путем нагрева, может быть разным в зависимости от качества каждой отдельной пластинки и от каждого номера эмульсии (выпуска) того же типа. Поэтому надо подобрать условия нагрева, особенно продолжительность. Долголетний опыт с нагретыми пластинками доказывает, что пластинки, хранимые после нагрева в холодильнике, можно употребить еще через один, два или три месяца и их качество не изменится. После этого срока может незначительно возрасти плотность вуали (приблизительно 0.1) и понизиться чувствительность (около 5%).

Повторный нагрев пластинок, которые уже раз подвергались этому процессу, не рекомендуется. Чувствительность, правда, еще повысится, но плотность вуали возрастает до 0.6, и такая эмульсия для целей спектроскопии не применима.

4. Нагрев в азотной среде. Дальнейшего повышения чувствительности по сравнению с пластинками, гиперсенсibilизированными нагревом в воздухе, можно достичь при помощи нагрева в азотной и водородной среде или в смеси этих газов, в инертных газах или в вакууме [4—6 и 8—13]. Благоприятное влияние азотной атмосферы было открыто случайно. Как указывает А. Д. Смит [6], при фотографической фотометрии квazarов во Флориде надо было беречь фотографические пластинки в течение экспозиции от влияния водяных паров флоридского воздуха. Поэтому сконструировали воздухонепроницаемые коробки, наполненные азотом, который проще всего было достать. Каково было удивление, когда при таких условиях время экспозиции сократилось на половину привычного срока. Независимо от этого было установлено, что нагрев в азоте способствует уменьшению отклонений от эффекта взаимозаместимости [например, 4, 5 или 10]. На основании этих и других сведений мы решили разработать данный метод, и уже первые эксперименты показали, что чувствительность эмульсии ПаО по сравнению с необработанными пластинками повысилась в три раза, а у типа IIIA в некоторых случаях даже в пять раз.

Поскольку термостат, применяемый при нагреве в сухом воздухе, не пригоден для такой операции, надо было сконструировать специальную установку, схема которой приводится на рис. 5, а общий вид на рис. 6. В установке можно производить нагрев в вакууме, в воздушной среде, в азоте или в других газах.

Термостат изготовлен из алюминиевого сплава и состоит из основания 14 с рабочей частью 13. В нижней части находятся нагревательные элементы, которые погружены в воду 12. Под рабочей частью находится теплообменник 9, который образован системой соединенных друг с другом концентрических круговых каналов, прикрытых сверху приклеенной латунной плиткой. Азот поступает во внешний канал и после предварительного нагрева проходит в рабочую часть через отверстие в центре этой плитки. Равномерное распределение азота по всей рабочей части обеспечивает разводная пластинка 10, которая размещается в 0.5 мм над верхней латунной плиткой теплообменника.

Крышка 13 прикрепляется к фундаменту с помощью восьми винтов. В середине крышки находится клапан 8, через который азот уходит в атмосферу, и вывод от термистора 11, который служит для контроля температуры выходящего азота. Клапан 7 обеспечивает поступление азота в рабочую часть. Вакуум достигается благодаря двухступенчатому роторному вакуум-наосу 19, который к рабочей части присоединен посредством вакуумного клапана 15. Насос и клапан приводят в действие выключатели 20 и 21. Азот поступает из баллона через редукционный клапан 3, давление контролируется манометром 4 и далее понижается в регуляторе 5 до 10 Па. «Т»-клапан 6 дает возможность прямого поступления азота в рабочую часть или через холодильник 17 с жидким азотом, чтобы очистить его от воды. Жидкий азот находится в сосуде 18. Время нагрева настраивается на временном выключателе 1, за которым помещен регулятор температуры 2. Вода, которая под влиянием повышенной температуры увеличивает свой объем, вытесняется в сосуд 16.

В начале процесса откачиваем из рабочей части воздух и два или три раза промываем ее азотом. Поскольку диаметр рабочей части термостата 500 мм и высота 20 мм, можно туда одновременно положить, например, две пластинки 200×250 мм. Для целей прямой фотографии можно использовать высокую крышку, которая приспособлена для требуемого количества пластинок. Чаще всего пластинки гиперсенсibilизируются 6 ч при температуре 65° С и протекании азота 0.2 л/мин.

Когда пластинки остынут, мы вынимаем их из термостата и один или два образца подвергаем вышеупомянутому сенситометрическому контролю. Плотность вуали равномерна, ее интенсивность несколько

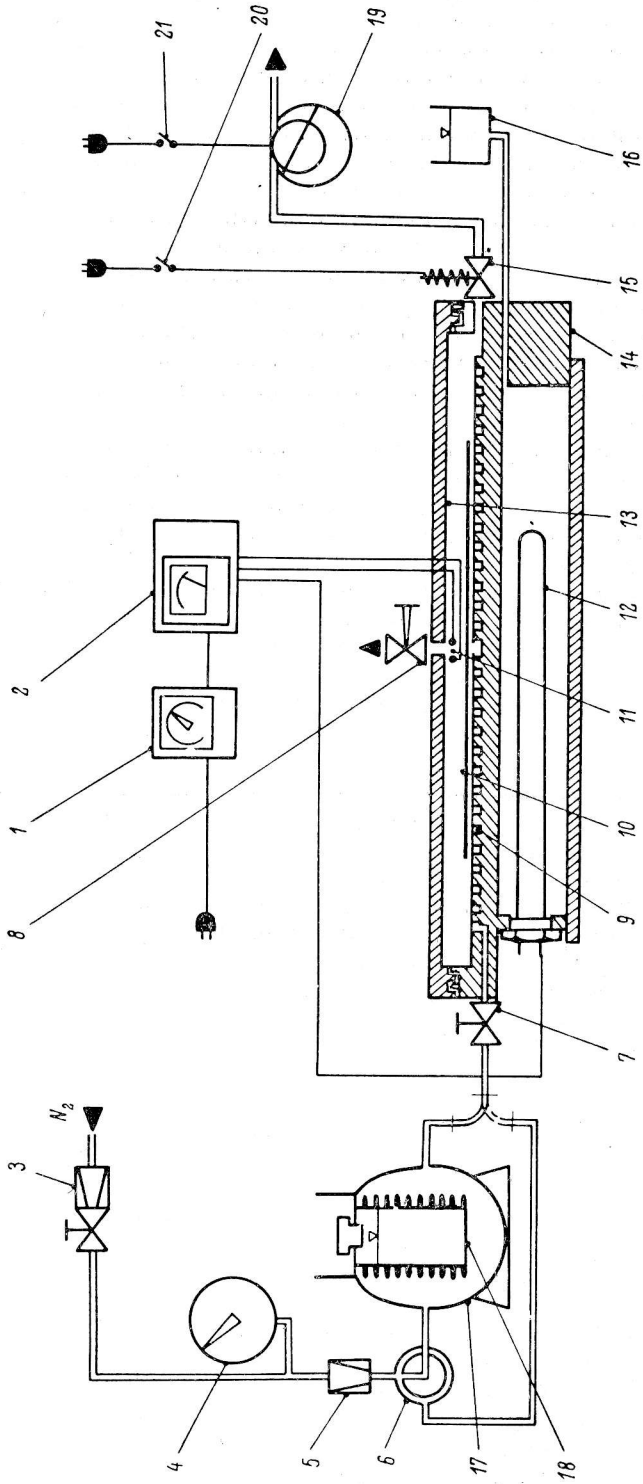


Рис. 5. Схема установки для нагрева фотографических пластинок в азотной среде.

понижена по сравнению с нагревом в воздушной среде. Какого-либо влияния на структуру зерна не было замечено, пример достигнутых результатов приведен в табл. 3. Пластинки следует хранить в холодильнике и срок их годности зависит от типа эмульсии. Для типа IIIaJ рекомендуется употребление в течение двух недель, тогда как тип IIaO сохранился и после трех месяцев, только немного увеличилась вуаль. Пла-

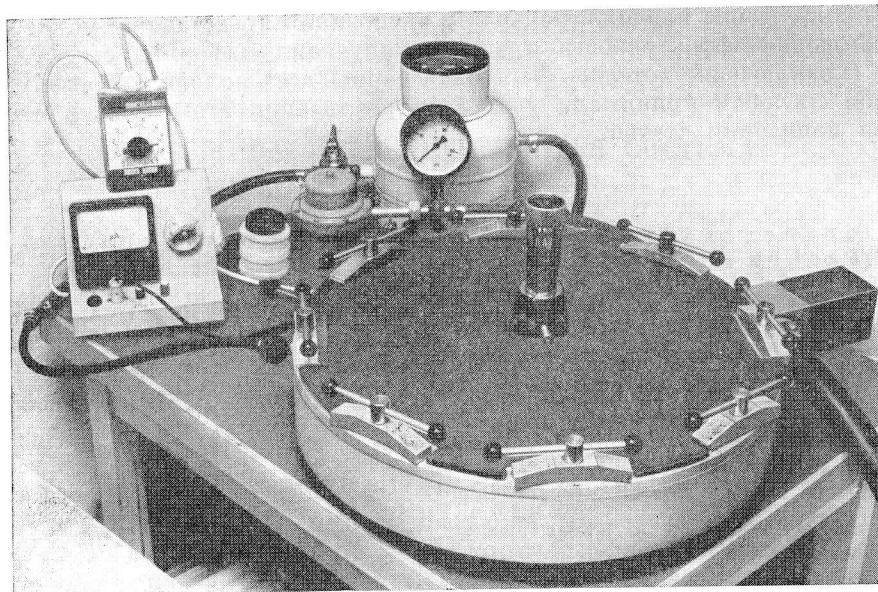


Рис. 6. Общий вид установки для нагрева пластинок.

стинки, нагретые в азоте, выгодно хранились в азотной атмосфере, и в настоящее время мы проводим долговременные эксперименты по такому хранению.

Сравнение результатов, полученных при нагревании пластинок в воздухе и в азоте, видно из сенситометрических характеристик на рис. 3 и 4. Все образцы экспонированы в камере с фокусным расстоянием 700 мм в куде-спектрографе. Спектрофотометрическая калибровка измерена для длины волны 443 нм.

На рис. 3 приведен пример повышения чувствительности пластинок IIaO: 1 — ненагретая эмульсия, плотность вуали $D_v = 0.11$; 2 — эмульсия, нагретая в воздухе, 65° С, 6 ч, $D_v = 0.20$; 3 — эмульсия, нагретая в азоте, 65° С, 6 ч, $D_v = 0.18$.

Для плотности $D = 0.6$ над вуалью повышается чувствительность при нагреве в воздухе в 2.1 раза и в азоте в 3 раза.

ТАБЛИЦА 3
Результаты повышения чувствительности путем нагрева
в азотной среде

Сорт эмульсии	Условия нагрева, °С/ч	Повышение чувствительности (время экспозиции 60 мин)	Плотность вуали	
			нормальная	после нагрева
IIaO	65/6	2.0—3.0	0.14	0.20
103aO	65/6	2.0—2.5	0.22	0.30
IIIaJ	65/6	3.1—5.0	0.10	0.20
09802	50/8	1.4	0.13	0.22

Пример результатов повышения чувствительности пластинок IIIaJ на рис. 4: 1 — ненагретая эмульсия, плотность вуали $D_v = 0.08$; 2 — эмульсия, нагретая в воздухе, 50°C , 12 ч, $D_v = 0.10$; 3 — эмульсия, нагретая в воздухе, 65°C , 6 ч, $D_v = 0.22$; 4 — эмульсия, нагретая в азоте, 65°C , 6 ч, $D_v = 0.20$. Для плотности $D = 0.6$ над вуалью чувствительность повышается при нагреве в воздухе в 1.9 или 3.02 раза и в азоте в 4.8 раза.

Поскольку рабочее время у больших телескопов очень дорого, каждое сокращение продолжительности экспозиции представляет то же самое повышение эффективности процесса получения информации.

В заключение хотелось бы поблагодарить всех коллег, которые каким-либо способом принимали участие в реализации этого эксперимента и при написании статьи.

Список литературы

1. Чехословацкий стандарт ЧСН 66 6401. Praha, 1965. 210 с.
2. Z a c h o v a l L. Физические основы фотографии. Praha АН, 1965, 312 с.
3. K u b a l J. Основы фотографии. Praha, АН, 1956, 280 с.
4. K o d a k Plates and Films Scientific Photography. P-315, New York, 1973. 50 p.
5. AAS-Photo-Bulletin, 1969—1976, No 1—2.
6. S m i t h A. G. New Trends in Celestial Photography. — Sky and Telescope, 1977, 53, p. 24—28.
7. Д о к у ч а е в а О. Д., Б и р у л я Т. А. О повышении чувствительности фотографических пластинок подогреванием. — АЦ, 1974, № 849, с. 3—5.
8. P r o c e e d i n g s of IAU Working Group on Photographic Problems, Grenoble, August, 1976, 25, 315 p.
9. M o d e r n Techniques in Astronomical Photography. Geneva, May, 1978.
10. B a b c o c k T. A., F e r g u s o n P. M., J a m e s T. H. Effects of moisture, oxygen, baking... of Kodak plates. — Astron. J., 1974, No 1, p. 92.
11. L e w i s W. C., J a m e s T. H. Effects of evacuation on low intensity reciprocity... — Photogr. Sci. Eng., 1969, 13, p. 54.
12. S m i t h A. G., S c h r a d e r H. W., R i c h a r d s o n W. W. Respose of type 111 aJ Kodak spectroscopic plates to baking in various controlled atmospheres. — Appl. Opt., 1971, 10, p. 1597.
13. S c o t t R. L., S m i t h A. G. Hypersensitization of Kodak type 103aO plates by nitrogen baking. — Astron. J., 1974, 79, No 5, p. 656.