

## ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

*Г. А. Георгиева, В. Г. Дебур, В. С. Рылов*

Дано описание установки для исследования спектральной чувствительности или квантового выхода фотоэлектронных приборов (ФЭП) и методика ее измерения. Рассмотрены результаты применения различных ФЭП в качестве образцовых светоприемников и источники ошибок измерения спектральной чувствительности. Установка и методика успешно используются в обсерватории с 1975 г.

A description of an instrument for investigation of the spectral sensitivity or the quantum yield of photoelectronic devices and its measurement techniques are given. The results of application of different photoelectronic devices as standard light receivers and the sources of spectral sensitivity measurement errors are considered. The instrument and the techniques are used successfully at the Observatory since 1975.

Фотоэлектронные приборы (ФЭП), преобразующие оптическое излучение в поток электронов путем внешнего или внутреннего фотоэффекта, принято характеризовать спектральной чувствительностью или квантовым выходом как важнейшим параметром прибора.

У реальных фотокатодов вакуумных ФЭП квантовый выход зависит не только от длины волны  $\lambda$  излучения, но и от элемента на площади фотокатода, с которого снимается сигнал, т. е. от его зонной чувствительности. Более того, зонная чувствительность, будучи измерена в интегральном свете, может резко отличаться от зонной чувствительности в узких спектральных диапазонах. Это явление было впервые обнаружено нами в 1975 г. при исследовании электронно-оптических преобразователей (ЭОП) астрономического назначения.

Исследование фотокатодов является важнейшим фактором при разработке новых фотоэлектронных приборов или при подготовке их к астрономическим наблюдениям. В 1974 г. при разработке ЭОП типа УМК-92щв в качестве подложки вносимых фотокатодов была использована тонкая слюда (синтетическая), пропускание которой в оптическом диапазоне, начиная от УФ-области, было близким к 90 %. Однако измерения светочувствительности таких фотокатодов в узких спектральных интервалах показали, что выходной поток модулируется на 6—12 % из-за интерференции света в слюде, тем самым снижая фотометрическую точность измерений. Аналогичное явление имеет место в ФЭУ со слюдяным окном или в твердотельных светоприемниках, защищенных тонким слоем окиси кремния (фотодиодах).

При хорошо организованной службе эталонов приемников оптического излучения (образцовых приемников) имеется возможность исследования стабильности спектральной чувствительности фотокатодов в течение длительных периодов и выяснения причин ее изменения. Такой контроль необходим не только на стадии разработок новых светоприемников, но и при эксплуатации, когда появляются сомнения в величине квантового выхода системы регистрации.

Многолетний опыт работы на установке лаборатории астросветоприемников по исследованию спектральной и зонной чувствительности светоприемников убедительно показал, насколько она необходима в текущей деятельности обсерватории. Ежегодно производится до 300 измерений светоприемников: ФЭУ, ЭОП, диоконов, ПЗС-матриц, фотоэлементов и фотодиодов. Более того, довольно

часто мы проверяем ФЭП, принадлежащие другим обсерваториям. На этой же установке измеряются кривые спектрального пропускания светофильтров и различных оптических элементов.

**Описание установки и измерения на ней.** Исследования спектральной чувствительности различных типов фотоэлектронных приборов были начаты в лаборатории в 1975 г. За это время измерительная аппаратура претерпевала изменения только в части выбора опорных светоприемников, обзор которых будет

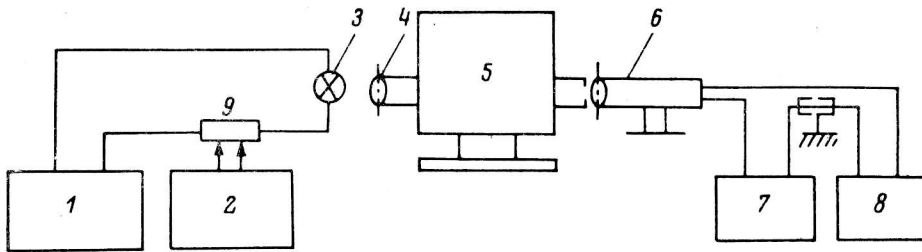


Рис. 1. Установка для измерения спектральной чувствительности приемников.

1 — источник питания СИП-10-30М (30 А, 10 В); 2 — универсальный измерительный прибор УИИП-60М; 3 — лампа СИ-10-300у с ленточным телом накала,  $\lambda$  270—1160 нм; 4 — кварцевый ахромат  $F=75$  мм, создающий изображение тела накала лампы на входной щели монохроматора; 5 — двойной монохроматор ДМР-4 с кварцевыми призмами; 6 — исследуемый или образцовый светоприемник; 7 — источник питания светоприемника (Б5-29); 8 — регистрирующий прибор микровольтмикроамперметр Ф-116/2; 9 — образцовая катушка сопротивления (0.001 Ом).

приведен ниже. Схема установки дана на рис. 1. В качестве диспергирующего прибора используется двойной монохроматор с кварцевыми призмами, специально предназначенный для фотометрических целей. Благодаря промежуточной щели монохроматор практически устраняет составляющую рассеянного света. Для наведения на определенный участок спектра излучения лампы СИ-10-300у в монохроматоре имеется отсчетный барабан со спиральной шкалой. Точность выставления длины волны по шкале составляет 1 %. Для более точного выставления используется дифференциальный метод, осуществляемый путем малого сдвига от ближайшей известной линии спектра лампы ДВС-25 или другой спектральной лампы. Обычно для измерения спектральной чувствительности

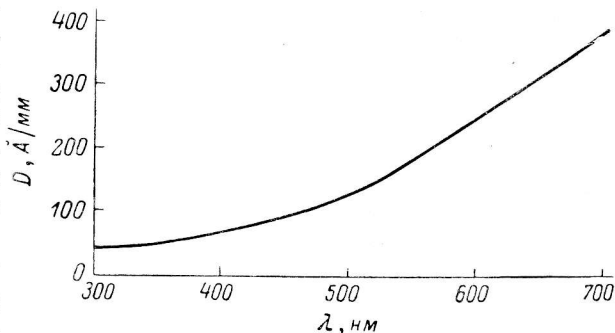


Рис. 2. Кривая обратной линейной дисперсии монохроматора ДМР-4.

полоса пропускания монохроматора в длинах волн составляла  $128 \text{ \AA}$  на  $\lambda=430$  нм и  $407 \text{ \AA}$  на  $\lambda=750$  нм.

Дисперсионная кривая (рис. 2) монохроматора измерена также по линейчатому спектру ДВС-25. Расстояния между линиями спектра измерялись в выходной щели микроскопом с измерительной сеткой, имеющей цену деления 16.7 мкм. Микроскоп устанавливали вместо светоприемника 6 (рис. 1).

Методика измерений заключается в следующем.

Производится измерение светового потока от опорного источника излучения — лампы СИ-10-300у на выходе монохроматора с помощью образцового светоприемника. Поток монохроматического излучения  $\Phi_\lambda$  (Вт) находим из отношения величины фототока  $I_{\text{обр}}$  (мА) образцового приемника к его светочувствительности, известной заранее,  $S_{\text{обр}}$  (мА/Вт):

$$\Phi_\lambda = \frac{I_{\text{обр}}}{S_{\text{обр}}}.$$

Определив величину фототока  $I_n$  исследуемого светоприемника при том же излучении СИ-10-300у, находим его светочувствительность  $S_n$  (мА/Вт):

$$S_n = \frac{I_n}{\Phi_\lambda} \left( \frac{\text{мА}}{\text{Вт}} \right) \quad (1)$$

или квантовый выход в электронах/фотон:

$$\eta = \frac{1.236}{\lambda} S_n \left( \frac{\text{эл}}{\text{фотон}} \right), \quad (2)$$

где  $S_n$  — мА/Вт;  $\lambda$  — нм.

Если на измерения  $I_n$ ,  $I_{\text{обр}}$  оказывает влияние паразитный сигнал светоприемника, то необходимо его измерять и вычитать из значения фототока. Очевидно,

что при этом возрастает ошибка определения  $S_n$ . Для минимизации этой ошибки увеличивают световой поток на приемник до уровня, при котором паразитный сигнал становится незначительным.

Лампа СИ-10-300у с ленточным телом накала эксплуатируется при токе 28 А, т. е. в недокале, что гарантирует ее стабильность и длительный срок службы. Источником питания является стабилизированный источник тока СИП 10-30М. В схеме, данной на рис. 1, лампа является опорным источником излуче-

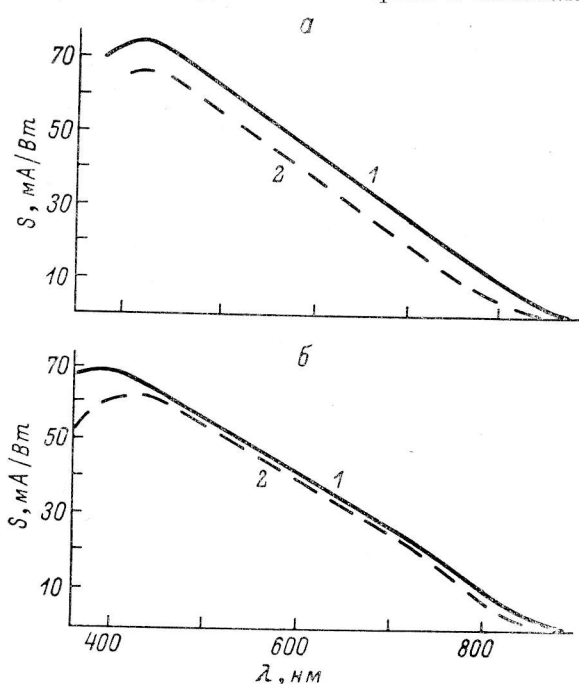


Рис. 3. Изменение спектральной чувствительности фотокатодов четырех ФЭУ-79.

1 — 1979 г.; 2 — 1984 г.

ния. Изображение тела накала лампы с помощью объектива, расположенного на двойном фокусном расстоянии от лампы и входной щели монохроматора, проектируется на щель монохроматора. Относительно лампы производится сравнение на выходе монохроматора исследуемого светоприемника с образцовым светоприемником, калиброванным в энергетических единицах — мА/Вт.

Зонная чувствительность светоприемников измеряется по площади светочувствительной поверхности с линейным разрешением, определяемым сечением  $1 \text{ мм}^2$  монохроматического потока  $\Phi_\lambda$ . Для измерения зонной чувствительности имеется механизм перемещения светоприемника относительно монохроматического пучка.

**Обзор образцовых светоприемников.** Начиная с 1975 г. было опробовано в качестве образцовых много типов светоприемников, каждый из которых обладал как достоинствами, так и недостатками. Считая, что результаты, полученные при работе с ними, представляют интерес, мы кратко изложим их в хронологическом порядке применения.

В 1975—1978 гг. использовались фотоэлектронные умножители ФЭУ-79 в количестве 10 штук, которые были взяты из поступлений 1971 г. и откалиброваны по спектральной чувствительности в мА/Вт во ВНИИОФИ (Москва). В ходе использования этих ФЭУ в измерениях они периодически сравнивались между собой. Набор из 10 ФЭУ позволял нам уверенно выявлять остаточные изменения чувствительности у отдельных экземпляров. Контроль чувствительности велся в диапазонах  $\lambda = 440, 600, 775 \text{ нм}$ . Было установлено, что в среднем из всей партии 10 ФЭУ за 3 года чувствительность в  $\lambda = 440$  и  $600 \text{ нм}$  уменьши-

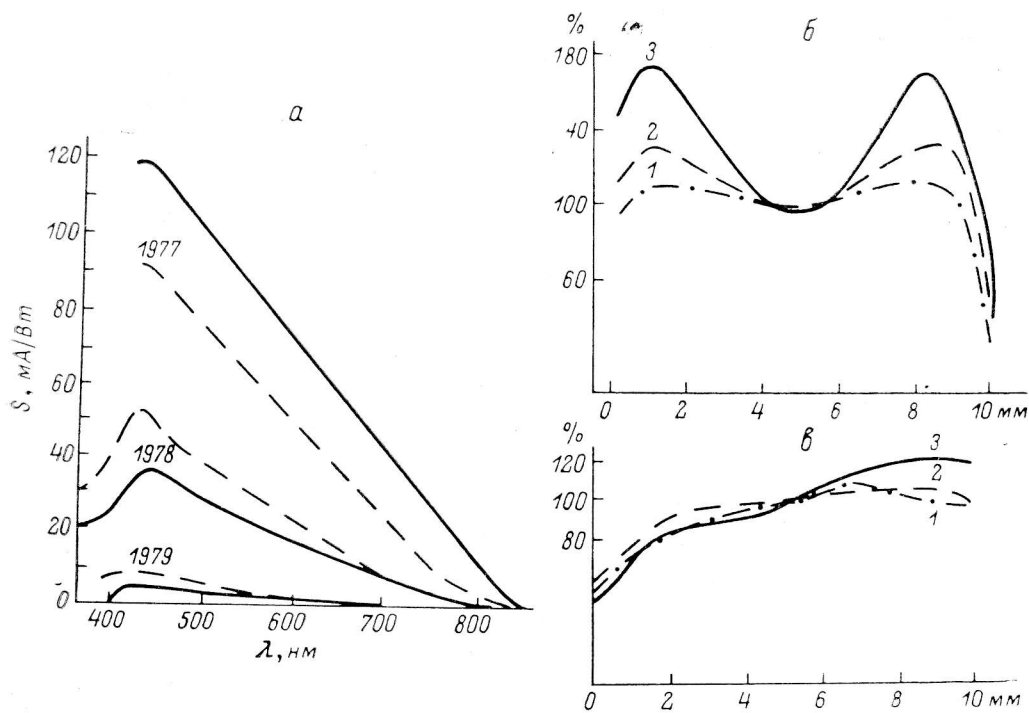


Рис. 4.

а — светочувствительность двух вакуумных фотоэлементов (тип «ВИНТ») в 1977, 1978, 1979 гг. Сплошная линия — для одного, штриховая — для другого фотоэлемента.  
 б — зонная чувствительность фотоэлементов при  $\lambda$ , нм: 1 — 436, 2 — 649, 3 — 790.  
 — зонная чувствительность фотоэлементов в поперечном по сравнению с измерениями на рис. 4, б направлении.

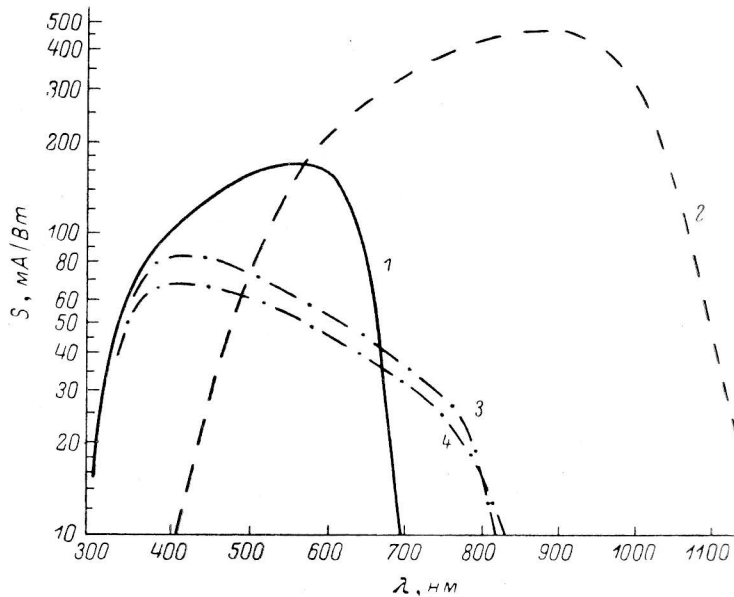


Рис. 5. Спектральная чувствительность образцовых светоприемников:

1 — УФ-01; 2 — ФД-7К; 3 — ФЭУ ЕМ1, 1979 г.; 4 — то же, 1984 г.

лась на 10 %, а в красной области ( $\lambda=775$  нм) — в 1.3 раза. К 1984 г. изменение чувствительности составило соответственно 11 % и 1.4 раза. На рис. 3 приведены кривые спектральной чувствительности ФЭУ-79 для 1975 и 1984 гг. Полученные данные свидетельствуют о некоторой нестабильности фотокатодов ФЭУ-79, имевшихся в нашем распоряжении. Из практики известно, что путем отбора можно стать владельцем стабильного ФЭУ, но из наших измерений следует, что периодический контроль применяемых ФЭУ необходим.

В 1977 г. была сделана попытка использования в качестве образцовых двух вакуумных фотоэлементов. Однако большая неравномерность зонных

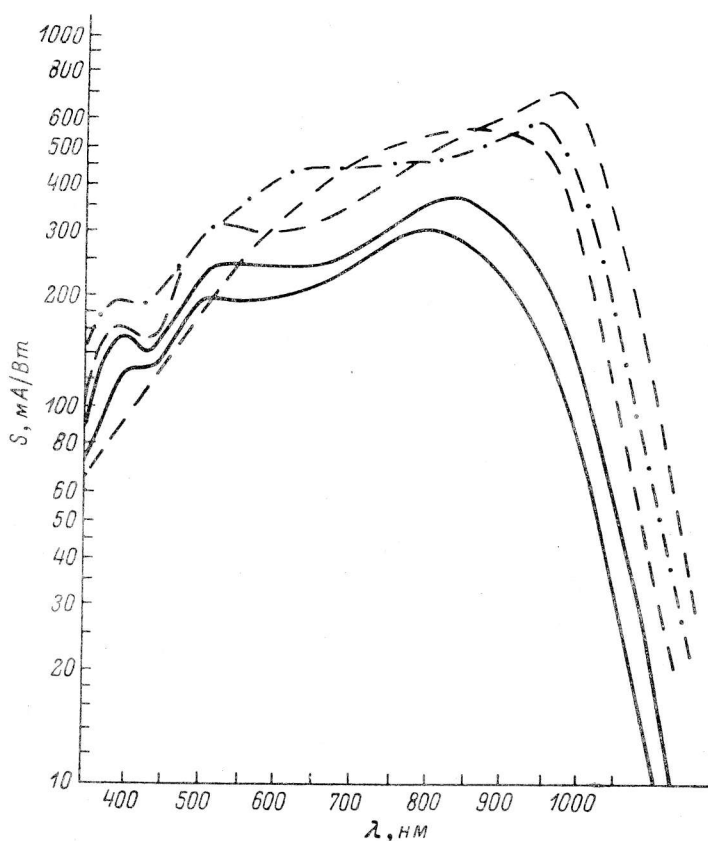


Рис. 6. Светочувствительность фотодиода ФД-24К (штриховая линия), светочувствительность четырех фотодиодов ФТИ (сплошные и штрихпунктирные линии).

характеристик и быстрый спад спектральной чувствительности к 1979 г. не позволили использовать вакуумные фотоэлементы в качестве образцовых (рис. 4). На рис. 4, а спектральная чувствительность двух фотоэлементов представлена в порядке ее убывания в 1977, 1978 и 1979 гг. соответственно.

Начиная с 1979 г. в качестве образцовых использовались два фотоприемника: селеновый фотоэлемент УФ-101 (в диапазоне длин волн 340—550 нм) и кремниевый фотодиод ФД-7К ( $\lambda=550\div1100$  нм). Исследовался также ФЭУ ЕМ1 9658, имевшийся в одном экземпляре. На рис. 5 представлены кривые спектральной чувствительности УФ-101, ФД-7К, ФЭУ ЕМ1 9658. Для данного экземпляра ФЭУ ЕМ1 обнаружено небольшое уменьшение чувствительности с 1979 до 1984 г. (рис. 5). Хотя приемники ФД-7К и УФ-101 подтвердили свою стабильность, но их использование имеет ограничения, поскольку диапазон спектральной чувствительности у них не охватывает весь оптический диапазон излучения.

В течение 1981 г. исследовались по чувствительности 20 кремниевых фотодиодов ФД-24К с целью их применения в качестве образцовых приемников

Все кремниевые фотодиоды оказались стабильными в пределах ошибок измерений, которые, по данным ВНИИ ОФИ, составляют 2 % в максимуме чувствительности и 5 % на краях диапазона. Кроме того, светочувствительность фотодиодов охватывает весь оптический диапазон, от 320 до 1100 нм, и тем самым дает возможность вести измерения с помощью одного светоприемника (рис. 6, штриховая кривая).

С 1983 г. нами используются в качестве образцовых приемников кремниевые фотодиоды, изготовленные во ФТИ им. Иоффе АН СССР. От ФД-24К они отличаются повышенной чувствительностью в ультрафиолетовой части спектра. Квантовый выход отдельных экземпляров превышает 80 % во всем оптическом диапазоне излучения (рис. 6). Благодаря этим качествам новые фотодиоды позволяют повысить точность измерения светочувствительности фотоэлектронных приемников.

В результате регулярного исследования, анализа и отбора стабильных светоприемников в настоящее время мы располагаем большим набором образцовых светоприемников (УФ-101, ФД-7К, 4 диода ФД-24К, 4 диода ФТИ), которые позволяют исключить ошибки измерений из-за ухода характеристик одного из приемников. Путем сравнительного кругового исследования их чувствительности облегчается оценка ошибки измерения спектральных характеристик других ФЭП. Источником ошибок, помимо изменения чувствительности образцовых приемников, изменяющейся со временем, являются также: смена ламп СИ-10-300у, изменения ширины щелей монохроматора, отсчеты по шкале монохроматора и микровольтмикроамперметра Ф-116/2 и т. д.

Результат наших неоднократных оценок ошибок измерения спектральной чувствительности показывает, что в настоящее время эти ошибки составляют: в диапазоне  $\lambda=650\div 850$  нм — до 3 %; в диапазоне 480—650 и 850—950 нм — менее 10 %; на краях оптического диапазона с  $\lambda=350\div 480$  и 950—1100 нм — около 15 %.

Измерения показывают, что наиболее стабильными являются кремниевые фотодиоды, имеющие высокую светочувствительность в широком диапазоне длин волн.

Помимо текущих измерений спектральной чувствительности ФЭП описанная выше методика позволила успешно вести разработку новых астрономических ЭОП типа УМК [1, 2] и исследование новых ФЭУ для астрофотометрии [3].

В заключение авторы выражают благодарность В. Л. Суханову за предоставленные фотодиоды и В. В. Мальцеву за помощь в работе.

#### Литература

1. Э О П М 9 щ в для 6-метрового телескопа / М. М. Бутслов, А. Н. Буренков, Л. В. Гвягянен и др. — *Астрофизика*, 1980, 16, с. 180—186.
2. Д в у х к а м е р н ы й Э О П для Большого телескопа / Г. И. Брюхевич, Л. В. Гвягянен, Э. И. Зак и др. — *Астрофизика*, 1984, 21, с. 380—386.
3. И с с л е д о в а н и е некоторых типов ФЭУ и возможность их применения в широкополосной астрофотометрии / Г. А. Георгиева, В. Г. Дебур, С. И. Неизвестный. — *Сообщ. САО*, 1985, 44, с. 5—38.

Поступила в редакцию 12.04.85