

УДК 535.242

© Э. В. Кувалдин

## ФОТОМЕТРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТРАЖЕНИЯ ПРИРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ В СПЕКТРАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА

В статье приводятся описания нескольких типов приборов для измерения коэффициента спектрального отражения природных объектов, а также специального образца для их калибровки. Фотометры рассчитаны для работы в полевых условиях.

### ВВЕДЕНИЕ

Для обеспечения исследований спектрально-коэффициентов отражения почвы и растительности в Государственном оптическом институте им. С.И. Вавилова созданы оптические приборы и на их основе разработаны новые технологии для решения научных и прикладных задач в экологии, геологии и сельском хозяйстве [1–6]. Приборы специально разрабатывались для работы в полевых условиях. Структурная, оптическая и электронные схемы выбирались также с учетом этой основной задачи. Схемы обработки полученной информации в различных приборах разные в зависимости от того, в какие годы разрабатывался прибор. В приборах начала 90-х годов применялся цифровой отсчет результата измерения с последующей записью оператором (прибор ПИФ-М). В следующих моделях уже имелся встроенный микропроцессор, который позволял выводить массив данных либо на бытовой магнитофон с последующей расшифровкой на компьютере (прибор СПУ), либо непосредственно в компьютер или на принтер прямо из прибора без применения компьютера (прибор ПИФ2). Наряду с автоматизированными приборами разрабатывались и совсем простые и легкие приборы с ручной установкой 100 % шкалы и использованием естественного освещения. Все приборы комплектовались эталонными образцами для проверки и корректировки чувствительности прибора в полевых условиях.

Поскольку изначально выдвигалось требование управления прибором одним оператором, то конструирование прибора производилось с учетом этого требования, габариты и масса приборов делались минимально возможными. Серьезные проблемы возникали с устранением внешней засветки, т. к. приборы, как правило, работали при солнечном освещении, и рассеянного света в связи с небольшими габаритами оптических схем. В приборах с микропроцессорами калибровка

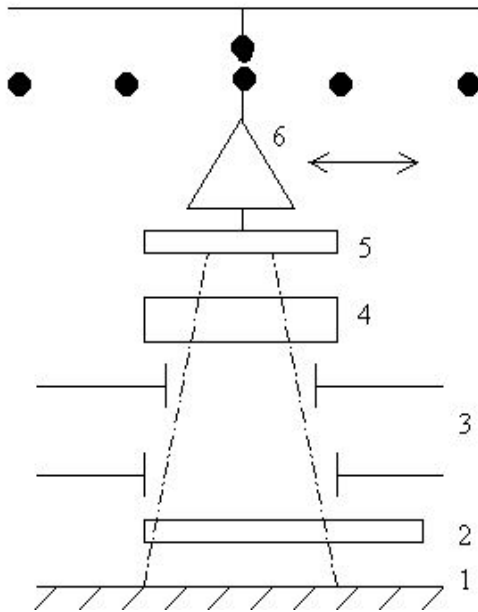
производилась как по измеряемому потоку (100 % отсчет), так и по нулевому сигналу при закрытом входном окне. Расчет результата измерения производился с учетом проведенной калибровки. Кроме этого, предусмотрена возможность ввода абсолютных значений спектрального коэффициента отражения эталона.

Все приборы можно разделить на два вида: это приборы с использованием внешнего освещения (СПУ, СБС, ПЗФ) — дистанционные приборы, или радиометры-компараторы, — и с встроенным осветителем (ПИФ-М, ПИФ2) — накладные фотометры. В данной статье основное внимание обращено на более подробное описание принципов, заложенных в приборы, оптических схем и способов преодоления возникших трудностей при разработке и эксплуатации приборов в полевых условиях.

### РАДИОМЕТРЫ-КОМПАРАТОРЫ

#### Портативный спектрально-коэффициентный фотометр-компаратор ПЗФ

Прибор обеспечивает наземные заверки дистанционных данных со спутников и позволяет проводить сравнительные измерения спектральных коэффициентов яркости отдельных участков земной поверхности в пределах от 2 до 100 % с геометрией измерения примерно 0/45°. Освещенность на измеряемой поверхности при этом должна быть в пределах  $1 \cdot 10^3$ – $1 \cdot 10^5$  лк. Спектральные интервалы прибора по уровню 0.5 от максимальной чувствительности составляют: 380–470 нм; 520–590 нм; 620–700 нм; 730–950 нм; 1050–1650 нм и соответствуют диапазонам дистанционной коммерческой системы Ландсат. Погрешность измерения коэффициента спектральной яркости при постоянной освещенности 3 % [7]. Оптическая схема прибора (рис. 1) имеет 5 независимых каналов. Каналы переключаются в электрической схеме прибора.



**Рис. 1.** Оптическая схема каждого из 5 независимых каналов портативного спектрального фотометра-компаратора ПЗФ. 1 — измеряемая поверхность; 2 — эталон отражения; 3 — диафрагма; 4 — светофильтр; 5 — фотоприемник; 6 — масштабный усилитель. Пояснения в тексте

В каждом канале имеется фотоприемник 5 со своими светофильтрами 4 и диафрагма, определяющая угловое поле зрения прибора. На некотором расстоянии от диафрагмы помещается эталон отражения 2 (см. ниже), который легко откидывается и выводится из поля зрения прибора, при этом прибор "видит" измеряемую поверхность 1. Эталон отражения и измеряемый образец освещаются в одинаковых условиях для уменьшения систематической погрешности измерения. Прибор при калибровке по эталону и измерении находится в руке у оператора. В процессе калибровки оператор вручную устанавливает чувствительность прибора, соответствующую коэффициенту спектрального отражения эталонного образца в выбранном спектральном диапазоне (установка 100% шкалы прибора). Это делается путем изменения коэффициента усиления масштабного усилителя 6, включенного последовательно в сигнальный тракт прибора. Затем образец выводится из поля зрения, и цифровой индикатор показывает коэффициент спектрального отражения измеряемой поверхности. Эта операция повторяется для каждого из 5 каналов прибора. Полный комплект

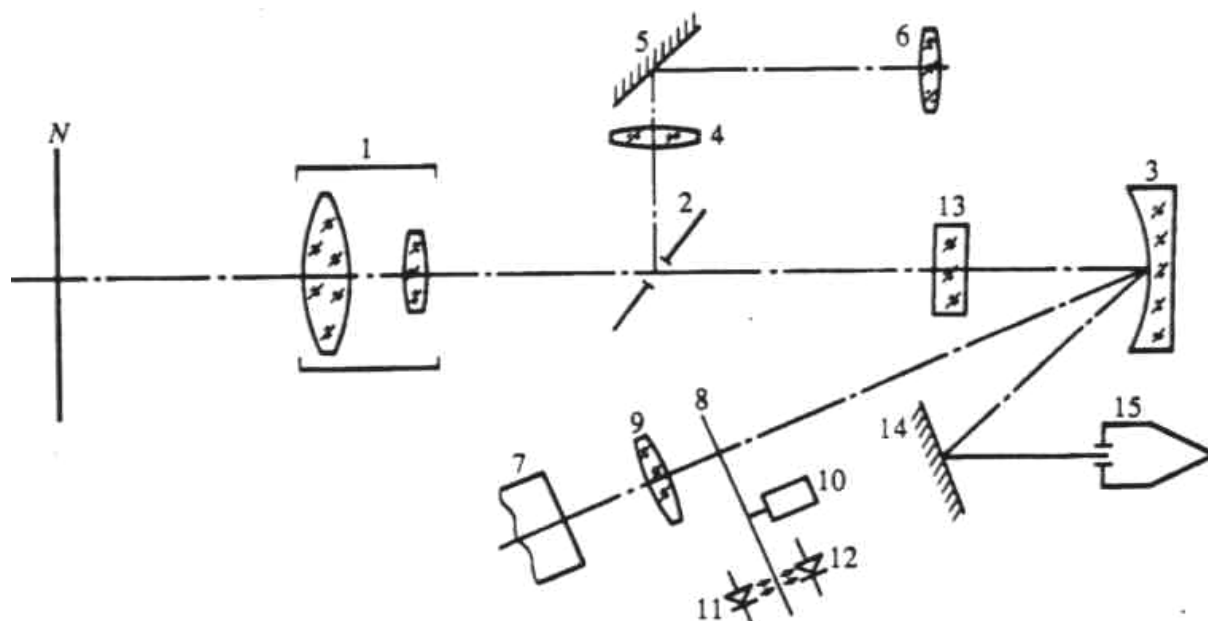
прибора весит менее одного килограмма, что очень удобно при работе в различных экспедициях. Весь цикл измерения занимает 2–3 минуты. Комплекта питания хватает на 2–3 недели работы с прибором.

### Быстродействующий спектрометр (СБС)

Спектрометр видимого диапазона 0.4–0.78 мкм, разрешение 10 нм, время регистрации спектра 0.006 с, что позволяет работать с ним, как с фотоаппаратом без установки на штатив и предварительной юстировки. Измеряемая величина — коэффициент спектральной яркости. Погрешность измерения в условиях постоянного освещения 5%. Сменная оптика позволяет регистрировать спектры отражения на разных расстояниях от объектов [8]. В оптической схеме прибора СБС (рис. 2) объектив 1 строит изображение объекта  $N$  в плоскости полевой диафрагмы 2 (использован фотографический объектив "Индустар-50" 1:3.5;  $f = 50$  мм). Полевая диафрагма 2 — зеркальная пластина с отверстием  $0.75 \times 1.1$  мм<sup>2</sup>, расположенная под углом 45° к оптической оси объектива, является одновременно входной щелью полихроматора. Прошедшее через полевую диафрагму излучение попадает на вогнутую стигматическую дифракционную решетку 3 ( $36 \times 36$  мм<sup>2</sup>, 600 штрихов/мм). Дифрагируемый пучок фокусируется на приемник излучения 7, в качестве которого используется ФЭУ-84-6.

Сканирование по спектру с частотой 200 Гц осуществляется с помощью диска 8, имеющего пять щелей шириной 1 мм, расположенных через 72°, вращаемого мотором 10. Сканирующий диск устанавливается в плоскости выходной щели. Коллектив 9 направляет излучение на фотокатод ф.э.у. Возле сканирующего диска установлена оптронная пара 11, 12. За входной щелью полихроматора установлен полосовой фильтр 13 из стекла марки БС-8, обрезаящий спектры 2-го порядка решетки при длине волны 375 нм. Излучение нулевого порядка дифракционной решетки, отражаясь от "черного" зеркала 14, улавливается светоловушка 15.

В приборе применен полихроматор с относительным отверстием 1:3.5, что позволяет сократить размеры прибора; угловое поле зрения в этом случае составляет около 18°. Габариты прибора при этом заметно уменьшаются. Однако возникает серьезная трудность. В малогабаритном приборе рассеянный свет достигает 10%. Для устранения его влияния на результат измерения первый и последний канал спектра излучения используются для измерения темного тока и тока засветки, которые вычитаются из всех остальных отсчетов



**Рис. 2.** Оптическая схема быстродействующего спектрометра СБС. 1 — объектив; 2 — полевая диафрагма; 3 — дифракционная решетка; 4 — объектив визира; 5 — зеркало; 6 — окуляр; 7 — приемник излучения; 8 — диск; 9 — коллектив; 10 — мотор; 11, 12 — оптронная пара; 13 —обрезающий светофильтр; 14 — зеркало; 15 — светоловушка. Пояснения в тексте

в микропроцессорном блоке обработки информации. На базе прибора СБС разработан дистанционный цветояркомер [9].

### Универсальный полевой спектрометр СПУ

Спектральный диапазон 0.4–2.5 мкм. Спектральное разрешение в диапазоне 0.4–1.1 мкм составляет 5–10 нм, в диапазоне 1.1–2.5 мкм — 10–20 нм. Измеряемая величина — коэффициент спектральной яркости. Погрешность измерения в условиях постоянного освещения 5% [10]. Фотометр СПУ выполнен по классическому варианту. В нем имеется монохроматор со сферической решеткой, механический коммутатор измеряемого потока и потока с образца сравнения, фотоприемное устройство и схема обработки информации. Переключаемый спектральный диапазон разбит на 4 участка, переключение которых производится сменой решетки. Решетки установлены на вращающемся барабане, смена производится вручную. Код установленной решетки передается в контроллер. Одновременно производится переключение приемников излучения. Коммутатор представляет собой зеркальный диск с вырезами, через которые проходит поток от измеряемого об-

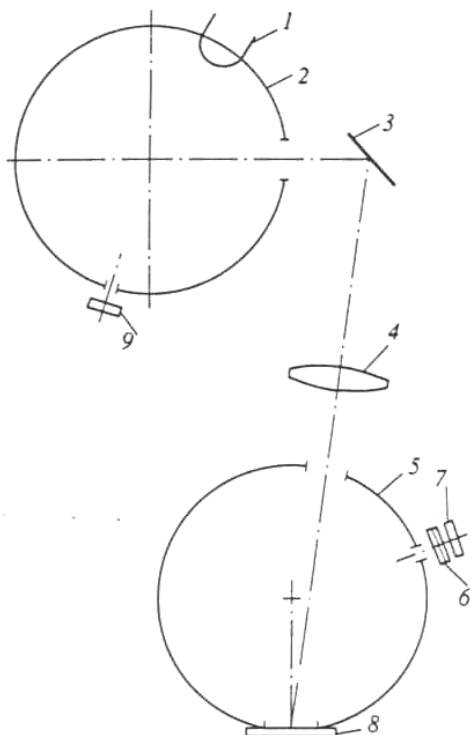
разца. Поток от эталона отражается от зеркальной части коммутатора. Эталон установлен параллельно поверхности земли и направлен вверх, так что он освещен так же, как и измеряемый образец. Частота коммутации около 25 Гц. За время коммутации освещенность на измеряемой поверхности и эталоне не успевает заметно измениться. Кроме этого окончательный результат берется как среднее из 64 выборок, что существенно улучшает воспроизводимость измерений. Результаты измерения выводятся на цифровой индикатор и могут записываться на бытовой магнитофон с последующим воспроизведением на совместимом с контроллером компьютере. Остальные узлы прибора выполнены с учетом требований работы в полевых условиях и других особенностей не имеют.

### НАКЛАДНЫЕ ФОТОМЕТРЫ

#### Прибор ПИФ-М

В приборах со встроенным источником излучения оптическая схема использует стандартные геометрии измерения  $8/D$  (прибор ПИФ-М) и  $D/0$  (прибор ПИФ2). Особое внимание при выборе схемы осветителя было обращено на равномер-

ность освещения измеряемого образца. Поскольку все природные образцы отличаются сильной неравномерностью по поверхности, то приходится их равномерно освещать для получения приемлемой воспроизводимости результата измерения и выбирать достаточно большой участок образца для усреднения по поверхности. Для этого в приборе ПИФ-М [11] с импульсной лампой используется оригинальная схема осветителя, в которой на образец изображается стенка шара, в котором помещена лампа. Лампа сама при этом находится вне хода лучей и непосредственно образец не освещает. Стенка шара с высоким коэффициентом отражения во всей используемой области спектра равномерно освещена за счет многократного отражения в шаре и тем самым обеспечивается равномерное освещение измеряемого образца. Оптическая схема прибора (рис. 3) состоит из осветительной и приемной частей. Для создания равномерного диффузного освещения исследуемого образца импульсная лампа 1 помещена в шар 2 с рассеивающей рабочей поверхностью. Выходное



**Рис. 3.** Оптическая схема прибора ПИФ-М. 1 — импульсная лампа; 2 — шар осветителя; 3 — зеркало; 4 — линза; 5 — приемный шар; 6 — светофильтры; 7 — приемники излучения; 8 — исследуемый образец; 9 — фотоприемное устройство опорного канала. Пояснения в тексте

отверстие шара 2 с помощью зеркала 3 и линзы 4 изображается на исследуемый образец 8, установленный на выходе приемного шара 5. Угол падения излучения на образец  $8^\circ$ , диаметр освещаемой зоны 15 мм. Осветительный и приемный шары изготовлены из алюминия. Для получения коэффициента диффузного отражения рабочих поверхностей шаров порядка 85% они были подвергнуты специальным механической и химической обработкам. За выходными отверстиями приемного шара 5 расположены пять приемных устройств, включающих в себя светофильтры 6 и приемники излучения 7 с предварительными усилителями. Для устранения погрешности, связанной с нестабильностью излучения лампы, в приборе предусмотрено фотоприемное устройство 9 опорного канала.

К недостатку такого осветителя следует отнести большие потери излучения, которые в данном случае перекрываются хорошей энергетикой импульсной лампы. Благодаря этому имеется возможность измерение производить в фотометрическом шаре, что позволяет легко разделить спектральные каналы прибора. Разделение производится фильтровым методом с использованием отдельных фотоприемников со своими светофильтрами. Приемники размещены в нижней части поверхности шара для устранения попадания первого отражения от поверхности образца на приемник излучения. С фотометрической точки зрения оптическая схема учитывает все требования к подобным измерениям. Результат этих измерений, пропорциональный коэффициенту отражения  $\rho$ , вычисляется в виде отношения сигналов измерительного и опорного каналов. Эту операцию проводят АЦП перемножающего типа 572ПВ1А. Применение второго аналогичного АЦП в качестве ЦАП позволяет запомнить результат измерения в виде напряжения на его выходе, которое измеряется третьим АЦП типа 572ПВ2. Со входа опорного канала через предварительный усилитель сигнал одновременно с АЦП поступает на компаратор со схемой задержки начала измерения относительно поджига импульсной лампы. С выхода компаратора импульс запуска поступает на АЦП. Таким образом, вместе с измерением отношения сигналов в каналах производится запоминание результата измерения от одиночного импульса излучения.

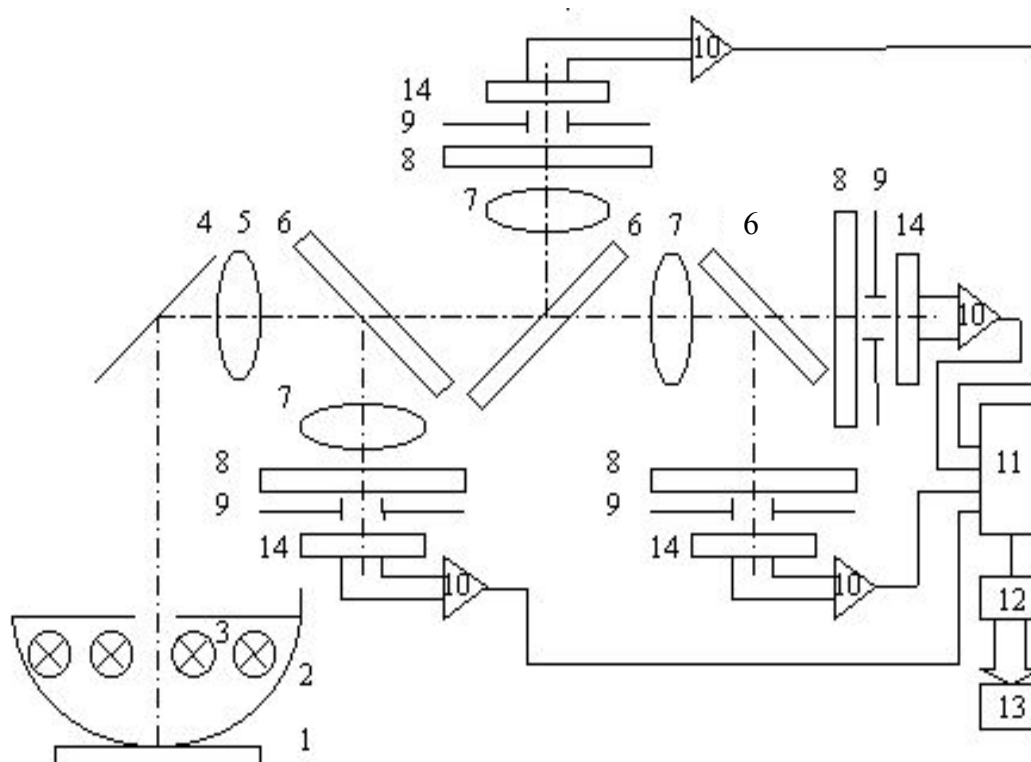
Несмотря на все предпринятые меры, получить сходимость измерений менее 0.5% в этом приборе не удастся из-за большого разброса энергии вспышки импульсной лампы от импульса к импульсу. Результат измерения в каждом спектральном канале получается в виде отношения отсчетов в измерительном и опорном каналах. Однако из-за того, что спектральные интервалы измеряемого и опорного каналов разные, происходит лишь частичная компенсация нестабильности источника

излучения. По этой причине разделение каналов в спектральных приборах с импульсной лампой производится после монохроматора или же используются два однотипных монохроматора в измерительном и опорном каналах. Кроме того, не удается полностью в малогабаритном приборе устранить электромагнитные наводки от поджига и разряда импульсной лампы, которые вносят заметный вклад в нестабильность работы прибора.

### Прибор ПИФ2

Устранить этот недостаток удалось в следующей модификации прибора ПИФ2, в котором использована лампа накаливания в импульсном режиме работы [12]. Импульсный режим работы позволяет устранить влияние внешней засветки на результат измерения в полевых условиях работы прибора. Разработанный автором метод измерения (патент №2198383 от 10.02.2003 г. Способ измерения фотометрических характеристик материалов)

позволяет полностью избавиться от этих недостатков. Схема постепенного включения лампы с управлением от микропроцессора обеспечивает долговечность работы ламп. Достаточно упомянуть, что за пять лет работы нескольких приборов ПИФ2 не было ни одного случая выхода из строя ламп накаливания в импульсном режиме работы. Благодаря инерционности лампы накаливания измерение производится после выключения лампы, что позволяет полностью избавиться от электрических наводок на измерительные цепи прибора. Однако энергетический потенциал прибора с лампой накаливания в полевых условиях работы значительно ниже, чем с импульсной лампой. Поэтому в приборе ПИФ2 используется геометрия измерения  $D/0$ , которая энергетически более выгодна, чем  $8/D$  [13], и источник расположен в шаре, так что он непосредственно освещает измеряемый образец (рис. 4). Для обеспечения равномерности засветки образца применено шесть маломощных ламп накаливания расположенных симметрично



**Рис. 4.** Оптическая схема прибора ПИФ2. 1 — измеряемый образец; 2 — шар; 3 — осветитель; 4 — зеркало; 5 — объектив; 6 — светоделительные пластинки; 7 — линзы; 8 — полосовые фильтры; 9 — диафрагмы; 10 — усилители; 11 — электронный коммутатор; 12 — АЦП; 13 — контроллер; 14 — фотоприемные устройства

по окружности вокруг образца. Разделение спектральных каналов производится светоделительными пластинами. В этом приборе среднеквадратическое отклонение результатов измерений удалось получить 0.07%. Это позволило реализовать ряд новых методик измерения природных объектов и получить интересные результаты, прежде всего с растительностью. Поскольку лампа накаливания практически не излучает в ультрафиолетовой области спектра, то в приборе ПИФ2 имеется всего четыре спектральных канала. По этой причине приборы ПИФ-М и ПИФ2 дополняют друг друга. Реализовать указанный алгоритм работы в приборе ПИФ2 удалось только с применением микропроцессорного устройства обработки информации. Оно позволяет хранить результаты измерения в памяти прибора, проводить предварительную статистическую обработку информации, передавать данные в компьютер и выводить их непосредственно на принтер без использования компьютера, что очень удобно в полевых условиях. Программа обработки результатов составлена специально для измерения растительности и содержит вычисление характерных изменений в растениях.

### ОБРАЗЕЦ СРАВНЕНИЯ

Параллельно с разработкой фотометрических приборов проводились исследования материалов и покрытий для создания образцов сравнения, работающих в широкой области спектра. Использование новых технологий образования керамики на алюминии позволило создать очень твердые однородные и химически стойкие покрытия. Исследование оптических свойств покрытий показало, что при некотором фиксированном технологическом процессе можно создать образцы с хорошими фотометрическими свойствами [14]. Коэффициент диффузного отражения такого образца (рис. 5, б) в широкой области спектра 0.4–2.5 мкм, что почти соответствует солнечному спектру излучения, мало изменяется. Это позволяет использовать образец с таким покрытием в качестве образца сравнения в фотометрах, на которых проводятся относительные измерения. Особенно удобны они для проверки фотометров, измеряющих коэффициент поглощения (отражения) в солнечном излучении и в спектрофотометрах-компараторах. Абсолютное изменение коэффициента отражения для разных партий образцов колеблется в пределах 0.5–0.7 и преимущественно сосредоточено в области значений 0.55–0.65. Зависимость коэффициента яркости от угла наблюдения на длине волны 633 нм (рис. 5, а) показывает хорошее соответствие индикатрисы коэффициента

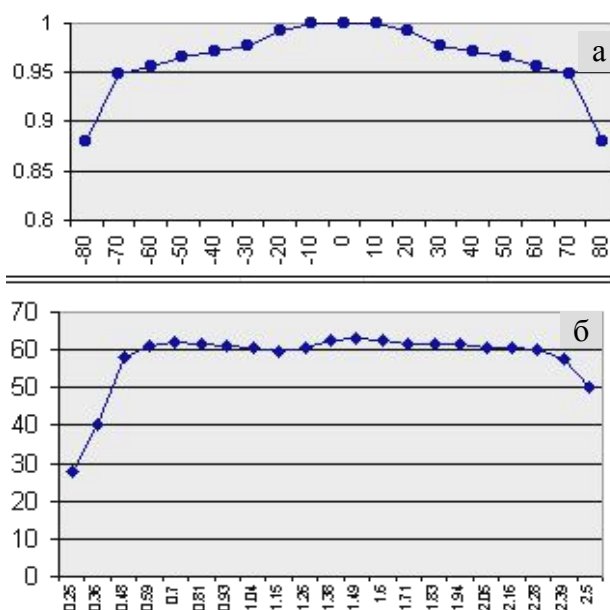


Рис. 5. Коэффициенты диффузного отражения образцов сравнения: а — яркость в зависимости от угла отражения; б — зависимость от длины волны

отражения закону Ламберта в пределах углов 0–80°. Аналогичная зависимость для молочного стекла МС-20 соответствует закону Ламберта только в пределах 0–60°.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные приборы успешно эксплуатировались на протяжении 5–10 лет. За это время были разработаны методики определения состояний растений по спектрофотометрическим характеристикам, определены области применения для каждого прибора. В процессе эксплуатации были обнаружены также недостатки тех или иных типов приборов; с учетом выявленных недостатков приборы совершенствовались. Одним из основных направлений этих работ было снижение погрешности измерения в натуральных условиях. Еще в фотометре-радиометре ПЗФ была обнаружена сильная зависимость результата измерения от условий естественного освещения. Такая же зависимость присуща приборам-аналогам. В более поздней модели было обнаружено, что при изменении погодных условий освещения сильно меняется спектральный состав естественного излучения. Это приводит к непропорциональной зависимости отношения отсчета в каждом спектральном канале к сигналу опорного канала с несколько другим

спектральным распределением и, как следствие, к плохой воспроизводимости отсчетов. Этого недостатка лишены приборы спектрокомпараторы и накладные приборы с встроенным источником излучения. В большинстве случаев измерений характеристик природных объектов изменение информационных показателей объекта незначительно и редко превышает 1–2%, поэтому эти изменения в состоянии отслеживать только указанными типами приборов, особенно, если речь идет об изменении за достаточно большой промежуток времени. Приборы радиометрического типа (СБС и ПЗФ) пригодны для сравнения со спутниковыми данными и для более грубых оценок (прибор СБС, хотя и производит калибровку в тех же спектральных интервалах, что и измерение, но эти процессы разнесены значительно во времени, что увеличивает погрешность измерений).

Таким образом, для точных измерений наиболее приемлемы накладные фотометры и фотометры-компараторы с одновременным измерением отношения потоков измерительного и опорного каналов в одинаковых спектральных интервалах. Из разработанных приборов последнему требованию наиболее удовлетворяет прибор СПУ. Прибор был разработан 15 лет тому назад, и в нем устарело электронное оборудование, которое требует существенной переработки. Накладной фотометр ПИФ-2 в настоящее время наиболее точный прибор из рассмотренного ряда приборов. Однако в некоторых случаях применения в нем необходимо изменить спектральные интервалы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сурин В.Г., Попова Т.А., Кувалдин Э.В. Полевой фотометрический метод выявления и исследования биогеохимических аномалий // Геохимия. 1998. № 10. С. 1079–1089.
2. Сурин В.Г., Голоудин Р.И. Спектральные характеристики листьев тростника как индикатор экологического состояния водоемов // Исслед. Земли из космоса. 1995. № 2. С. 31–36.
3. Кувалдин Э.В., Сурин В.Г. Фотометрический метод оценки экологического состояния нарушенных экосистем на примере гари после лесного пожара // Оптический журнал. 2001. № 7. С. 70–72.
4. Сурин В.Г. Метод определения оптических характеристик листьев в полевых условиях // Лесоведение. 2001. № 2. С. 70–75.
5. Белоусов Ю.И. и др. Оптические приборы и методы определения газового состава воздуха и технического состояния газотранспортных систем // Оптический журнал. 1995. № 7. С. 44–54.
6. Ладнер Г.А., Матвеев А.В., Сурин В.Г., Меркурьев В.Н. Полевой спектрометрический метод выявления биогеохимических аномалий для решения геолого-поисковых и геоэкологических задач // Геологическое изучение и использование недр (Информационный сборник). М.: АОЗТ Геоинформмарк, 1995. Вып. 6. С. 13–23.
7. Kuvaldin E.V., Surin V.G. Low cost spectrozonal photometer for natural object reflectance measuring // Proc. 2-nd Int. Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, San Francisco California, 24–27 June, 1996.
8. Кувалдин Э.В., Сурин В.Г. Быстродействующий спектрометр для исследования спектров отражения природных объектов // ПТЭ. 1994. № 4. С. 154–157.
9. Кувалдин Э.В., Демкина Л.В., Левин В.А., Цевелев В.В. Дистанционный измеритель координат цвета, цветности и цветовых различий // Оптический журнал. 1995. № 7. С. 26–28.
10. Кувалдин Э.В., Меркурьев В.Н., Сурин В.Г. Широкодиапазонный автоматизированный полевой спектрометр-спектрокомпаратор // Оптический журнал. 1993. № 5. С. 48–52.
11. Гилевич И.Г., Кувалдин Э.В., Цветкова С.Н. Новый фотометр для определения коэффициента поглощения солнечного излучения // Химия высоких энергий. 1995. № 1. С. 53–55.
12. Кувалдин Э.В. Импульсные фотометры диффузного и смешанного отражения // Оптический журнал. 1995. № 6. С. 48–52.
13. Кувалдин Э.В., Сурин В.Г. Специализированный фотометр для измерения патологических и физиологических изменений в растениях // Оптический журнал. 1998. № 5. С. 43–46.
14. Кувалдин Э.В. Образец диффузного отражения для проверки фотометров // Оптический вестник. 1992. Т. 23, № 11. С. 5.

**ФГУП ВНИЦ ГОИ им. С.И. Вавилова,  
Санкт-Петербург**

Материал поступил в редакцию 15.10.2004.

## **SOLAR SPECTRAL REGION PHOTOMETERS FOR NATURAL OBJECTS REFLECTANCE MEASUREMENTS**

**E. V. Kuvaldin**

*S.I. Vavilov State Optical Institute, Federal State Unitary Enterprise, All-Russia Scientific Centre, Saint-Petersburg*

A few types of devices for spectral reflectance measurements of nature objects and a special sample for calibration of these devices are described. Photometers are designed for field applications.