УДК 621.397.13: 535.65

# АБСОЛЮТНАЯ КАЛИБРОВКА ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ С МАЛЫМ ПОЛЕМ ЗРЕНИЯ

© 2007 г. **Ф. Сигернес**[*], профессор; **И. М. Холмс**[*]; **С. А.Черноус**[**], канд. физ.-мат. наук; **Т. Свиню**[***], доктор наук; **М. Дирланд**[*]; **Д. А. Лоренцен**[*], доктор наук; **И. Моен**[*,****], профессор; **Ч. С. Дир**[*****], профессор

[*] Университетский центр Свальбарда, Лонгиербюен, Шпицберген, Норвегия

[**] Полярный геофизический институт КНЦ РАН, Апатиты

[***] Норвежский полярный институт, Нью-Алезунд, Шпицберген, Норвегия

[****] Физический факультет Университета Осло, Осло, Норвегия

[*****] Геофизический институт Университета Аляски, Фербенкс, Аляска, США

В связи с наступающим Международным Полярным Годом (2007–2008) в Арктике работает сеть высокочувствительных оптических приборов для регистрации и мониторинга слабых свечений в верхней атмосфере, в первую очередь полярных сияний и свечения ночного неба. Необходимость сравнения данных оптических измерений в различных пунктах требует высокой точности их интеркалибровки в рамках международных стандартов. В настоящей статье дается обзорное представление математических методов обработки данных фотометров с малым полем зрения и описание экспериментальной установки (расположенной в Университете Свальбарда на Шпицбергене) для их абсолютной калибровки. Представлены описание университетской специализированной оптической лаборатории и результаты сертификации и контроля яркости вторичных стандартов калибровочных ламп, используемых для тарировки оптических приборов.

Коды OCIS:

*Поступила в редакцию 25.06.2007.*

## Введение

Наблюдения полярных сияний космическими и наземными оптическими средствами дают важную информацию о состоянии ближнего космоса, в первую очередь магнитосферы и ионосферы Земли, и их взаимодействии с солнечным ветром [1, 2]. Особенно важны оптические измерения в полярной шапке, где можно наблюдать прямое вторжение солнечных частиц, возбуждающих эмиссии полярных сияний. Важной составной частью наземных и космических наблюдений является абсолютная калибровка[1] аппаратуры, действующей в экспедиционных условиях Арктики. Настоящая работа представляет как методы решения общих проблем, связанных с калибровкой оптической аппаратуры, так и описание конкретной калибровочной системы, установленной в Университете Свальбарда на Шпицбергене.

Действующий поток фотонов на выходе оптического прибора зависит от их потока на входе и от способности прибора воспринимать излучение, т. е. геометрических факторов и качества используемых оптических компонентов [3]. Эффективность каждого из таких компонентов, как зеркала, линзы, дифракционные решетки или фильтры, ограничивает чувствительность и рабочий спектральный диапазон прибора. Процесс преобразования выходного потока в электронный сигнал (счет) детектора также обуславливает потери потока фотонов. Вследствие этих причин оптический прибор необходимо калибровать с помощью источника излучения известной интенсивности для того, чтобы получить соотношение между электронным сигналом (счетом) на выходе детектора и числом поступающих на вход питающей оптики фотонов. Этим калибровочным источником может быть специальная лампа или любой другой объект с известными спектральными характеристиками. Кроме того, для полного равномерного заполнения поля зрения фотометра излучением необходима диффузно отражающая поверхность. Специфика измерений свечения ночного неба и полярных сияний предполагает использование внесистемных единиц измерения (рэлей) для расчета объемной концентрации фотонов вдоль направления наблюдений, и учет этого – особенность данной статьи. Работы, посвященные абсолютной калибровке приборов в энергетических единицах, например [4, 5], являются одной из составных частей оптических атмосферных исследований в России. Цель данной работы – обзорное рассмотрение принципов абсолютной калибровки, описания и конкретной реализации экспериментальной установки, использующей поверхность Ламберта и стандартную вольфрамовую лампу накаливания. Демонстриру-

[1] Здесь и далее под термином “абсолютная калибровка” понимается калибровка аппаратуры по абсолютным значениям величины.

ются метод преобразования сертифицированных параметров лампы и процедура регулирования яркости экрана без изменения их спектральных характеристик. Представленные данные содержат достаточно полную информацию для воспроизведения калибровочного стенда заинтересованными организациями.

## Теоретические обоснования. Поверхность Ламберта

Поверхность, отражающая излучение в любых направлениях пропорционально косинусу угла между нормалью и направлением наблюдения, называется поверхностью Ламберта [6]. Обычно поверхностями Ламберта являются хорошо матированные диффузные поверхности. Интенсивность излучения такой поверхности выражается как

$$R_{\lambda\phi} = R_{\lambda 0}\cos\phi \text{ [фотон/(см}^2 \text{ с Å)]}, \qquad (1)$$

где $\lambda$ – длина волны, $\phi$ – угол относительно нормали к поверхности. Полная интенсивность излучения в интервале длин волн $d\lambda$ является интенсивностью излучения, интегрированной по полусфере,

$$N_\lambda = \int_0^{2\pi}\int_0^{\pi/2} R_{\lambda\phi}\, d\lambda \sin\phi d\phi d\psi. \qquad (2)$$

Подставляя уравнение (1) в (2), получим

$$N_\lambda = 2\pi R_{\lambda 0} d\lambda \int_0^{\pi/2} \cos\phi \sin\phi d\phi \qquad (3)$$

или

$$N_\lambda = 2\pi R_{\lambda 0} d\lambda \int_0^{\pi/2} (1/2)\sin 2\phi d\phi. \qquad (4)$$

Следовательно,

$$N_\lambda = \pi R_{\lambda 0} d\lambda \text{ [фотон/с]}. \qquad (5)$$

Таким образом, полное излучение поверхности Ламберта не зависит от углов $\phi$ и $\psi$. В нашем случае поверхность (SRT-99-180) сделана из спектралона и изготовлена компанией “Labsphere, Inc”. Коэффициент отражения экрана $\rho_\lambda = 0{,}98$ в видимой и ближней инфракрасной областях спектра (см. табл.1).

## Калибровочная установка

На рис. 1 представлена схема установки для абсолютной калибровки оптических приборов с малым полем зрения. Вольфрамовая лампа FEL (источник излучения) расположена на расстоянии

**Таблица 1.** Спектральные коэффициенты отражения в полусферу для поверхности SRT-99-180 от 3000 до 12 000 Å. Коэффициенты получены при угле 8° с нормалью к экрану

| Длина волны, Å | Коэффициент отражения |
|---|---|
| 3000 | 0,975 |
| 3500 | 0,981 |
| 4000 | 0,984 |
| 4500 | 0,984 |
| 5000–8500 | 0,986 |
| 9000 | 0,984 |
| 9500 | 0,986 |
| 10000 | 0,983 |
| 10500 | 0,986 |
| 11000 | 0,987 |
| 11500 | 0,985 |
| 12000 | 0,983 |

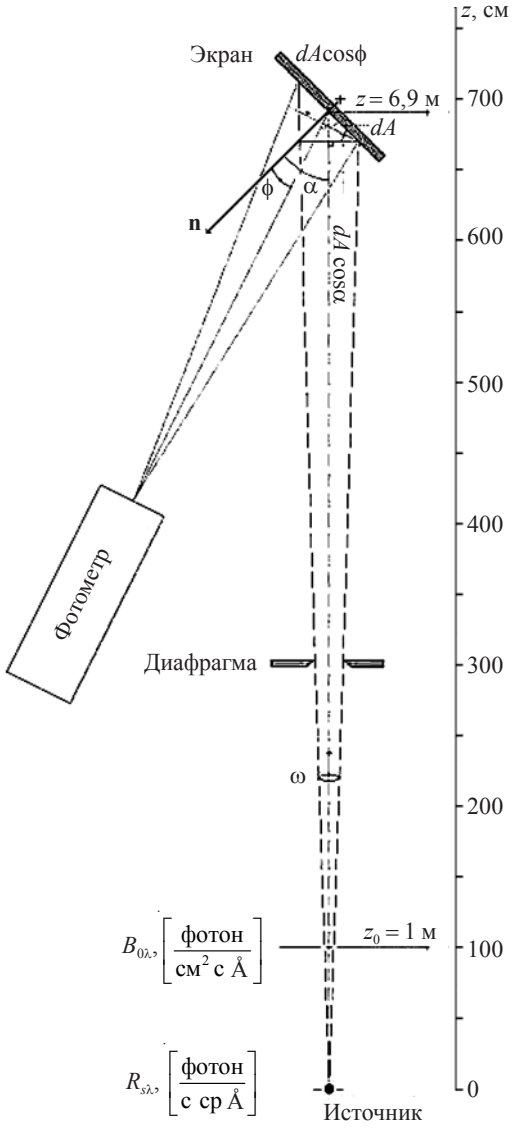



**Рис. 1.** Схема установки для абсолютной калибровки оптических приборов с малым полем зрения.

$z = 6{,}9$ м от центра экрана, $\alpha$ – угол между экраном и осью лампы, $B_{0\lambda}$ – известное (по сертификату) излучение лампы в единицах [фотон ср$^{-2}$ с$^{-1}$ Å$^{-1}$], первоначально полученное на расстоянии $z_0 = 1$ м. Таким образом, реальным источником излучения в данном устройстве является не лампа, а сам экран. Калибровочная лампа представляет собой точечный источник, излучающий фотоны изотропно. Полное число фотонов, проходящих через сферу с радиусом $z_0$, должно быть тем же самым, что и для сферы радиуса $z$,

$$4\pi z_0^2 B_{0\lambda} = 4\pi z^2 B_{z\lambda}. \qquad (6)$$

Если полагать, что в пространстве между сферами нет поглощения, то интенсивность излучения, падающего на экран, можно выразить формулой

$$B_{z\lambda} = B_{0\lambda}\left(z_0/z\right)^2 \ [\text{фотон}/(\text{см}^2\ \text{с Å})]. \qquad (7)$$

Соответственно, доля интенсивности излучения, поступающего на экран $R_{s\lambda}$, составит

$$R_{s\lambda}\, d\lambda\omega = R_{s\lambda}\, d\lambda\left(dA\cos\alpha/z^2\right), \qquad (8)$$

где $\omega$ – телесный угол, а $dA$ – освещенная площадь экрана.

Следовательно, переизлученная радиация выражается как

$$N_\lambda = R_{s\lambda}\, d\lambda\rho_\lambda\left(dA\cos\alpha/z^2\right) = \pi R_{\lambda 0}\, d\lambda. \qquad (9)$$

Из уравнения (1) можно получить

$$R_{\lambda\phi} = \rho_\lambda\left(R_{s\lambda}/\pi\right)\left(dA\cos\alpha/z^2\right)\cos\phi. \qquad (10)$$

Эффективная освещенная зона экрана, видимая калибруемым прибором, определяется выражением $dA\cos\phi$, где $\phi$ – угол между оптической осью и нормалью к экрану. Следовательно, поток излучения в направлении прибора выражается как

$$L_\lambda = R_{\lambda\varphi}/dA\cos\varphi \ [\text{фотон}/(\text{с ср Å см}^2)] \qquad (11)$$

или

$$L_\lambda = \rho_\lambda\left(R_{s\lambda}/\pi\right)\left(1/z^2\right)\cos\alpha. \qquad (12)$$

Из закона обратных квадратов и уравнения (7) известно,что

$$R_{s\lambda} = B_{z\lambda} z^2 = B_{0\lambda} z_0^2. \qquad (13)$$

Выходящее с экрана излучение по определению дается как

$$M_\lambda = \pi L_\lambda \ [\text{фотон}/(\text{см}^2\ \text{с Å})]. \qquad (14)$$

В конечном счете получаем

$$M_\lambda = B_{0\lambda}\rho_\lambda\left(z_0/z\right)^2\cos\alpha. \qquad (15)$$

Уравнение (15) выражает яркость экрана, видимую прибором, в терминах сертифицированных параметров лампы и экрана, расстояния между экраном и лампой, а также угла между экраном и осью лампы.

**Таблица 2.** Параметры вольфрамовой лампы мощностью 1000 Вт модели 83350 (ORIEL SN7-1275) в диапазоне 3000–12000 Å при номинальном расстоянии от лампы $z_0 = 0{,}5$ м, токе 8,2 А и напряжении 109,6 В

| Длина волны, Å | Интенсивность облучения, фотон/(см$^2$ с Å) | Интенсивность облучения, мВт/(м$^2$ нм) |
|---|---|---|
| 3000 | $2{,}50864\times10^{10}$ | 1,66323 |
| 3100 | $3{,}69681\times10^{10}$ | 2,37192 |
| 3200 | $5{,}23677\times10^{10}$ | 3,25498 |
| 3300 | $7{,}24319\times10^{10}$ | 4,36567 |
| 3400 | $9{,}79227\times10^{10}$ | 5,72848 |
| 3500 | $1{,}29415\times10^{11}$ | 7,35449 |
| 3600 | $1{,}67399\times10^{11}$ | 9,24877 |
| 3700 | $2{,}13774\times10^{11}$ | 11,49182 |
| 3800 | $2{,}69263\times10^{11}$ | 14,09381 |
| 3900 | $3{,}33435\times10^{11}$ | 17,00517 |
| 4000 | $4{,}07353\times10^{11}$ | 20,25562 |
| 4500 | $9{,}34056\times10^{11}$ | 41,28528 |
| 5000 | $1{,}73395\times10^{12}$ | 68,97640 |
| 5550 | $2{,}90009\times10^{12}$ | 103,93302 |
| 6000 | $3{,}97636\times10^{12}$ | 131,81648 |
| 6546 | $5{,}33603\times10^{12}$ | 162,13524 |
| 7000 | $6{,}45602\times10^{12}$ | 183,44323 |
| 8000 | $8{,}58708\times10^{12}$ | 213,49618 |
| 9000 | $1{,}01746\times10^{13}$ | 224,85917 |
| 10500 | $1{,}12813\times10^{13}$ | 213,70087 |
| 11500 | $1{,}14098\times10^{13}$ | 197,34076 |
| 12000 | $1{,}13833\times10^{13}$ | 188,67887 |

Заметим, что при полном заполнении поля зрения прибора ни угол $\phi$, ни расстояние прибора от экрана не имеют значения. Изменение размеров поля зрения на экране компенсирует дистанционную и угловую зависимости. В табл. 2 приведены параметры источника для используемой нами вольфрамовой лампы мощностью 1000 Вт. Преобразование энергетических единиц в поток фотонов требует учета энергии фотонов с каждой присущей им длиной волны.

## Оптическая лаборатория Университета Свальбарда

Описанная процедура требует затемненного помещения, для того чтобы исключить внешний свет, рассеянный экраном. Это учтено при создании новой калибровочной лаборатории Университета Свальбарда. Стенд расположен в трех комнатах. Комната с лампами отделена от комнаты с экраном дверью, оборудованной диафрагмой. Комната измерений, содержащая прецизионный блок питания лампы и калибровочный спектрограф, расположе-

на за первыми двумя комнатами. В качестве входной оптики используется волоконная шайба, которая вмонтирована в отверстие в стене между экранным помещением и комнатой измерений. Расстояние между лампой и экраном контролируется путем установки лампы на подвижном столе. Для того чтобы получить достаточно легкое продвижение и сохранять постоянным расстояние от центра, измеренное по горизонтали, параллельной экрану, используются рельсы. Стол выставлен по высоте, а зафиксированный лазер используется для совмещения положения лампы с центром экрана по вертикали. В этой конфигурации максимальное расстояние между экраном и лампой $z = 8{,}56$ м. Нормаль к экрану направлена точно по направлению к лампе с $\alpha = 0°$. Освещение в комнате обеспечивается лампами постоянного тока с напряжением +12 В. Когда эти лампы выключаются, они не создают никакого дополнительного фонового излучения, что может происходить при использовании газоразрядных осветителей. Блок электропитания калибровочной лампы ORIEL 68835 1KW связан с контроллером интенсивности света (КИС). Интенсивность свечения лампы непрерывно регистрируется, и ток через нить накаливания подбирается в реальном времени таким образом, чтобы интенсивность лампы была неизменной. Лампа мощностью 1000 Вт работает при токе 8,2 А. Главной особенностью установки является управление яркостью экрана только путем изменения расстояния $z$ (15). В качестве спектрографа применяется прибор фирмы “ORIEL”. В нем использована вогнутая голографическая дифракционная решетка (230 штр/мм) с номинальным спектральным интервалом 4000–11 000 Å. Детектором является термоэлектрически охлаждаемая ПЗС-матрица с динамическим диапазоном 16 бит производства компании “Hamamatsu” (модель INSTASPEC IV). На рис. 2 приведена оптическая схема прибора. Поле зрения в 22° обеспечивается волоконной кремниевой шайбой, используемой в качестве входной оптической системы с относительным отверстием 2,1. Входная щель находится в фокальной плоскости вогнутой дифракционной решетки. Фокусное расстояние может изменяться от 129,4 до 132 мм в зависимости от длины волны. Дифрагированный решеткой свет фокусируется и распределяется в выходной плоскости. Это иллюстрируется на рис. 2, где три разных луча отображают начало, центр и конец спектрального диапазона длин волн, регистрируемых ПЗС-матрицей. Полоса пропускания составляет около 80 Å при ширине входной щели 100 мкм. Спектральное разрешение системы среднее, но достаточное для наших целей, так как спектр вольфрамовой лампы довольно гладкий, непрерывный и

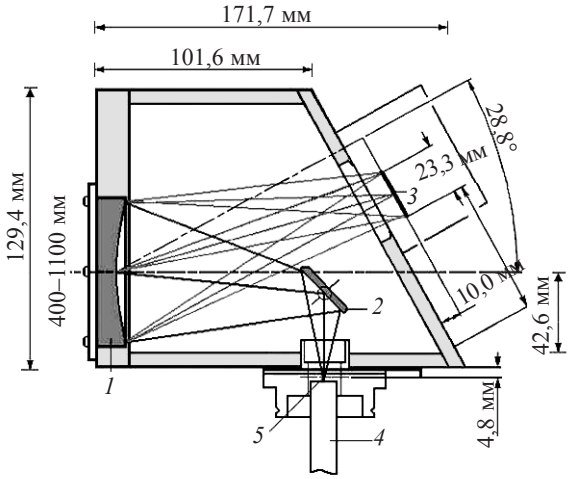



**Рис. 2.** Схема портативного спектрографа FICS SN 77443. *1* – вогнутая голографическая решетка, *2* – плоское зеркало, *3* – приемник излучения (ПЗС-матрица), *4* – оптоволоконный вход, *5* – входная щель.

в нем отсутствуют спектральные линии, которые должны разрешаться.

## Результаты

### *Спектральная градуировка спектрографа*

Для спектральной градуировки прибора, которая должна быть проведена перед его абсолютной калибровкой, используются газонаполненные лампы с известными эмиссионными линиями. Наиболее общим методом является идентификация пикселов, ассоциированных с заранее известными эмиссионными линиями. Для того чтобы минимизировать ошибку определения длин волн и проверить линейность вдоль их шкалы, должны быть идентифицированы по крайней мере три линии. Соответствующая определенному пикселу длина волны определяется как

$$\lambda \approx a_0 + a_1 p + a_2 p^2, \qquad (16)$$

где $p$ – номер пиксела. В результате такой процедуры будут вычислены константы $a_0, a_1$ и $a_2$. Спектральная градуировка спектрографа FICS 77443 обеспечивалась тремя ртутными лампами (рис. 3), при этом ограничения фильтрами спектральных областей, где наблюдаются более высокие порядки спектра, полученные с помощью дифракционной решетки, намеренно не производилось. Интенсивная эмиссия Hg на длине волны 2537 Å воспроизводилась трижды на длинах волн 5074, 7611 и 10148 Å во 2-, 3- и 4-м порядках соответственно. Данная ситуация ис-

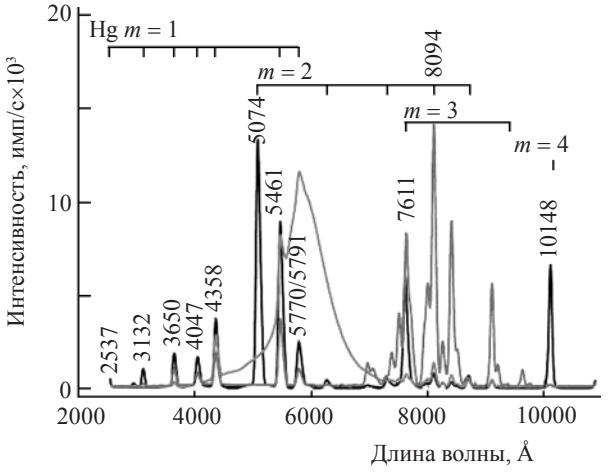



**Рис. 3.** Спектральная градуировка спектрографа FICS 77443. Спектры излучения ртутной лампы низкого давления (модель MS-416 Acton Research Corporation), лампы с парами ртути (SN K60-908 Edmund Optics Ltd) и флюоресцентной лампы (OSRAM F6T5) с источником питания постоянным током. Длина волны каждой линии излучения ртути и порядок спектра $m$ отмечены на рисунке.

**Таблица 3.** Калибровочные спектральные коэффициенты для спектрографа FICS 77443 в соответствии с уравнением (16). Детектор (ПЗС-матрица) имеет в составе 256×1024 пиксела. Спектральный диапазон 2650–10945 Å

| Коэффициент | Значение константы |
|---|---|
| $a_0$ | $2{,}56026\times10^{+3}$ |
| $a_1$ | $7{,}99624\times10^{0}$ |
| $a_2$ | $1{,}95299\times10^{-4}$ |

пользовалась для спектральной градуировки в дальней красной и ближней инфракрасной областях спектра. Ее результаты представлены в табл. 3.

*Преобразование параметров лампы*

Калибровочная сертифицированная вольфрамовая лампа (ORIEL SN7-1275) мощностью 1000 Вт, представляющая источник излучения, получена нами в Национальном институте стандартов (NIST). Эта лампа сначала была использована для калибровки спектрального прибора в области 4000–8000 Å. Калибровочный фактор, как функция длины волны, представляется выражением

$$K_\lambda = M_\lambda / C_\lambda^{1000\ \text{Вт}}\ [\text{фотон}/(\text{см}^2\ \text{с Å})]/[\text{имп/с}], \quad (17)$$

где $C_\lambda^{1000\ \text{Вт}}$ – темп счета фотонов в единицах на секунду. Затем эталонная лампа была заменена вторичным источником – вольфрамовой лампой мощностью 200 Вт. Расстояние между лампой и экраном составляло 8,56 м, время экспозиции – 160 мс. Эти параметры были постоянны в обоих случаях, что представляется важным, так как скорость счета, как функция времени экспозиции, необязательно является линейной. Кроме того, для ограничения наложения спектральных порядков перед волоконной шайбой устанавливался оптический фильтр. Оптическое окно сделано из стекла ВК-7, которое блокирует ультрафиолетовую часть спектра. На рис. 4 и в табл. 4 представлены результаты сертификации вторичного источника.

Отметим, что сертификация вторичного источника в спектральном диапазоне $\lambda > 8000$ Å требует установки фильтра, блокирующего порядки излучения в области, превышающей 4000 Å. Для этого в будущем планируется установить перед волоконной шайбой диск с фильтрами для обрезания излучения на $\lambda > 4000$ Å. Временным решением проблемы представляется использование зависимости $M_\lambda^{200\ \text{Вт}}$, представленной на рис. 4, отображающей функциональную пригодность вторичного источника мощностью 200 Вт на основе метода, развитого Сондерсом в NIST [7],

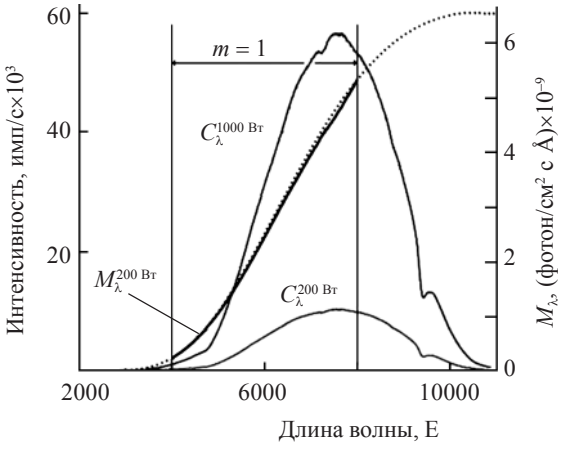



**Рис. 4.** Спектр излучения поверхности Ламберта (SRT-99-180). Кривые представляют собой счет импульсов в единицах [имп/с×10³] от этой поверхности при освещении ее вольфрамовой лампой (ORIEL SN7-1275) мощностью 1000 Вт и вольфрамовой лампой мощностью 200 Вт. Время экспонирования 160 мс, расстояние между лампой и экраном 8,56 м. Питание лампы 1000 Вт осуществляется током 8,20 А при напряжении 109,6 В, лампа 200 Вт питается током 6,50 А при напряжении 31,7 В. Угол экрана $\alpha = 0°$. На рисунке также представлена яркость ламбертовской поверхности в абсолютных единицах [фотон/(см² с Å)] при использовании лампы 200 Вт. Достоверный спектральный интервал при сертификации обозначается спектральным порядком $m = 1$.

**Таблица 4.** Параметры вторичного эталона вольфрамовой лампы (FRED SN01) мощностью 200 Вт в диапазоне 4000–8000 Å. Расстояние $z = 8{,}56$ м, ток 6,5 А, напряжение 31,7 В

| Длина волны, Å | Интенсивность облучения, фотон/(см$^2$ с Å) | Интенсивность облучения, мВт/(м$^2$ нм) |
|---|---|---|
| 4000 | $2{,}38984\times10^{8}$ | $1{,}18835\times10^{-2}$ |
| 4278 | $4{,}00913\times10^{8}$ | $1{,}86331\times10^{-2}$ |
| 4500 | $5{,}65822\times10^{8}$ | $2{,}50093\times10^{-2}$ |
| 4709 | $7{,}52522\times10^{8}$ | $3{,}17816\times10^{-2}$ |
| 4861 | $9{,}05840\times10^{8}$ | $3{,}70645\times10^{-2}$ |
| 5000 | $1{,}05729\times10^{9}$ | $4{,}20591\times10^{-2}$ |
| 5550 | $1{,}78254\times10^{9}$ | $6{,}38825\times10^{-2}$ |
| 5577 | $1{,}81933\times10^{9}$ | $6{,}48862\times10^{-2}$ |
| 6000 | $2{,}45369\times10^{9}$ | $8{,}13398\times10^{-2}$ |
| 6300 | $2{,}92463\times10^{9}$ | $9{,}23284\times10^{-2}$ |
| 6364 | $3{,}02521\times10^{9}$ | $9{,}45447\times10^{-2}$ |
| 6546 | $3{,}29816\times10^{9}$ | $9{,}99407\times10^{-2}$ |
| 6563 | $3{,}32326\times10^{9}$ | $1{,}00716\times10^{-1}$ |
| 7000 | $3{,}97446\times10^{9}$ | $1{,}12932\times10^{-1}$ |
| 8000 | $5{,}33294\times10^{9}$ | $1{,}32590\times10^{-1}$ |

$$M_\lambda^{200\ \text{Вт}} \approx \lambda/10^5 \exp(a - b/\lambda). \qquad (18)$$

Это уравнение имеет только два неизвестных, которые в нашем случае имеют значения $a = 73{,}9$ и $b = 52568$. Они получены на основании данных, представленных в табл. 4 для длин волн 4000 и 8000 Å.

*Контроль яркости экрана*

В соответствии с выражением (15) яркость экрана представлена как функция расстояния $z$. Другим рабочим приближением может быть варьирование тока лампы. Недостатком второго метода является изменение спектрального распределения интенсивности свечения лампы в зависимости от тока, что требует сертификации лампы при каждом значении тока. Для сохранения рабочего времени сертифицированной лампы мощностью 1000 Вт с целью демонстрации зависимости яркости экрана от расстояния мы использовали лампу мощностью 200 Вт. Время экспозиции при использовании спектрографа сохраняется неизменным и равняется 160 мс. Передвижной стол смещается по направлению к экрану с шагом 0,5 м. Как видно из рис. 5, спектральная характеристика остается постоянной, а интенсивность при этом возрастает обратно пропорционально квадрату расстояния. Описанная выше процедура повторялась также с помощью вольфрамовой лампы ORIEL SN7-1633 мощностью 45 Вт, что позволяет проводить калибровку для меньших интенсивностей. Отметим, что соотношение сигнал/шум, особенно в синей части спектра,

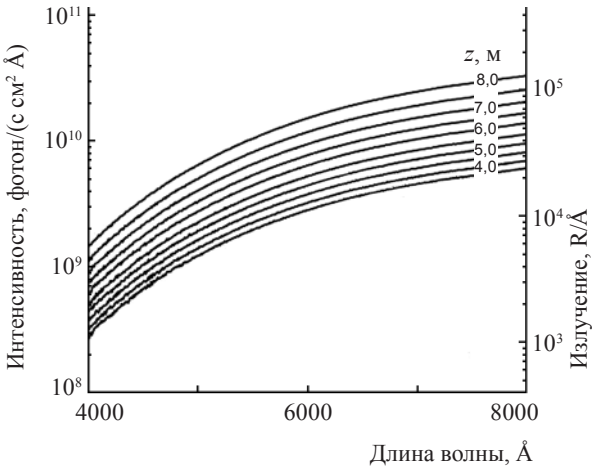



**Рис. 5.** Калибровочные спектры ламбертовской поверхности SRT-99-180 как расстояния $z$ между лампой и поверхностью при использовании 200-ваттной вольфрамовой лампы FRED SN01.

может быть улучшено простым увеличением времени экспонирования спектрографа. Так, замена времени экспонирования 160 мс на 4000 мс на расстоянии 8 м позволила создать спектр с диапазоном интенсивностей, занимающим полностью динамический диапазон детектора (16 бит). Следует обратить внимание на то, что данные по оси ординат в правой части рис. 5 представлены в единицах рэлей на ангстрем [R/Å]. Эти внесистемные единицы были введены специально для измерения свечения ночного неба и полярных сияний [8] и используются в физике атмосферы и космической геофизике в настоящее время в соответствии с уравнением, связывающим объемное свечение в столбе атмосферы сечением 1 см$^2$ с его поверхностной яркостью $L_\lambda$ [8, 9], измеряемой спектрофотометрической аппаратурой,

$$1\text{R} = (1/4\pi)\times10^6\ [\text{фотон/см}^2\ \text{с ср Å}]/[\text{имп/с}]. \qquad (19)$$

Для преобразования потока [фотон/(см$^2$ с ср Å)] в [R/Å] в уравнение (12) надо ввести множитель $4\times10^6$.

*Погрешности эксперимента*

Вольфрамовая лампа мощностью 1000 Вт, поставленная фирмой “ORIEL”, обеспечивает точность калибровки ± 3% в спектральном диапазоне 4000–8000 Å. Такая точность сохраняется в течение 50 ч работы лампы, после чего лампа должна быть заново откалибрована. Согласно данным “Oriel” скорость изменения параметров лампы составляет от 1 до 2% за каждые 100 ч работы в указанном диапазоне длин волн. Используемая нами процедура вторичного переноса согласно [10, 11] вносит по-

грешности, обусловленные расстоянием (0,14%), ориентацией и положением лампы (0,3%), повторяемостью измерений (0,15%) и посторонним излучением в лаборатории (0,2%) [12]. Таким образом, общая погрешность измерений, оцененная по сумме указанных погрешностей, не превышает 4%.

## Заключение

В Университете Свальбарда (Шпицберген) создана новая специализированная лаборатория для абсолютной калибровки оптических приборов с малым полем зрения на базе регулируемой яркости источника излучения. Две вольфрамовые лампы мощностью 200 и 45 Вт были сертифицированы в видимой области спектра (4000–8000 Å) с точностью ± 4%. Яркость калибровочной поверхности менялась в диапазоне 200–132 R/Å за счет изменения расстояния между калибровочной лампой и отражающим диффузным экраном. Описанная калибровочная процедура была проведена также в более широком диапазоне длин волн с использованием фильтров, блокирующих наложение порядков спектров в используемом спектрографе. Существует принципиальная возможность использования калибровочных ламп малой мощности (12–20 Вт) для измерения интенсивностей менее 200 R/Å. Представленные выше данные могут быть полезны как для разработчиков оптической аппаратуры, так и при проведении оптических измерений.

Авторы выражают благодарность Dr. Gerald Romick за полезные советы и О.В. Антоненко за помощь в работе.

*ЛИТЕРАТУРА*

1. *Авакян С.В., Евлашин Л.С., Коваленок В.В., Лазарев А.И., Титов В.Г.* Наблюдения полярных сияний из космоса. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 230 с.
2. *Sandholt Per-Even, Carlson H.C., Egeland Alv.* Dayside and polar cusp aurora // Kluver academic publishers, Dordreht/Boston/London, 2002. 287 p.
3. *Lerner J.M., Thevenon A.* The Optics of Spectroscopy. A Tutorial. V. 2.0, 1–56. Instruments SA Inc, Jobin-Yvon, 1988.
4. *Салин В.И.* Погрешность расчетного метода калибровки фотометров рассеянного солнечного излучения в энергетических величинах // Тр. II Международн. конфер. “Естественные и антропогенные аэрозоли”. 27.09–01.10 1999. Санкт-Петербург. С. 166–170.
5. *Кудрявцев В.В.* Методика определения градуировочных характеристик фотометров // Измерит. техника. 1986. № 9. С. 26–27.
6. *Lambert J.H.* Photometria, sive de mensura et gradibus luminis colorum et umbrae. Augsburg, 1760 // German trans. by E. Anding in Ostwald’s “Klassiker d. Exacten Wissenschaften” (Engelmann, Leipzig,1892). P. 324.
7. Oriel Instruments, Instruction Manual, Quartz tungsten halogen lamp standards of spectral irradiance: 1kW, 200W, 45W, 63350-M. P. 6. Stratford, CT 06497-0872, USA, 1996.
8. *Chamberlain J.W.* Physics of the Aurora and Airglow. New York and London: Academic Press, 1961. P. 569–573.
9. *Baker D., Romick G.* The rayleigh: interpretation of the unit in terms of column emission rate or apparent radiance expressed in SI units // Appl. Opt. 1976. № 15(8). P. 1966–1968.
10. *Walker J.H., Saunders R.D., Jackson J.K., Mielenz K.D.* Results of a CCPR intercomparison of spectral irradiance measurements by National Laboratories // J. Res. Natl. Inst. Standard Technol. 1991. V. 96. P. 647–668.
11. *Gröbner J., Rembges D., Bais A.F., Blumthaler M., Cabot T., Josefsson W., Koskela T., Thorseth T.M., Webb A.R., Wester U.* Quality assurance of reference standards from nine European solar-ultraviolet monitoring laboratories // Appl. Opt. 2002. V. 41. № 21. P. 4278–4282.
12. *Gröbner J., Sperfeld P.* Direct traceability of the portable QASUM irradiance scale to the primary irradiance standard of the PTB // Metrologia. 2005. V. 42. P. 134–139.