

СПЕКТРОФОТОМЕТР СУМЕРЕЧНОГО НЕБА

В. ПЫЛДМАА

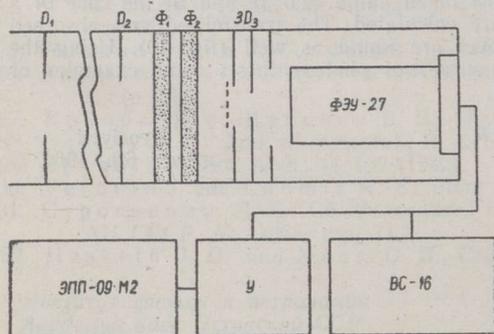
Существенная роль среди косвенных методов исследования физических свойств стратосферы и мезосферы принадлежит сумеречному методу.

Общий очерк современного состояния вопроса дается в недавно опубликованной монографии Г. В. Розенберга [1]. Там же приведены оригинальные результаты теории сумеречных явлений, позволяющие по непосредственным измерениям яркости сумеречного неба получить ценные сведения о строении атмосферы. Экспериментальный материал, относящийся к спектральной яркости сумеречного неба, довольно обширен, но подавляющее число измерений относится к определенным точкам солнечного вертикаля, например [2-6]. Лишь немногие измерения, например [4-6], выполнены в абсолютных единицах.

В 1963 г. в Институте физики и астрономии АН ЭССР произвели спектрофотометрирование сумеречного неба. Целью измерений было получение распределения спектральных яркостей в абсолютных энергетических единицах при зенитных расстояниях Солнца ζ_0 от 90 до 100°. А также исследование некоторых оптических свойств атмосферы, как например, рассеяние лучистой энергии на высотах от 20 до 100 км.

Применявшийся спектрофотометр состоит из следующих частей:

1. приемная система,
2. усилитель фототока,
3. регистратор,
4. механизм автоматического поворота спектрофотометра по вертикали.



Принципиальная схема спектрофотометра изображена на рис. 1. Приемником радиации является фотоумножитель ФЭУ-27, помещенный в трубку с диафрагмами D_1 и D_3 для ограничения поля зрения фотометра. Диафрагма D_2 служит для избежания попадания отраженной радиации

Рис. 1. Принципиальная схема спектрофотометра.

от стен трубки на приемник. Трубка снабжена закрывающим затвором Z для определения нуля системы. Φ_1 и Φ_2 — оправы для интерференционных фильтров, для люминофора или нейтрального фильтра. В фотометре не применялось оптических систем.

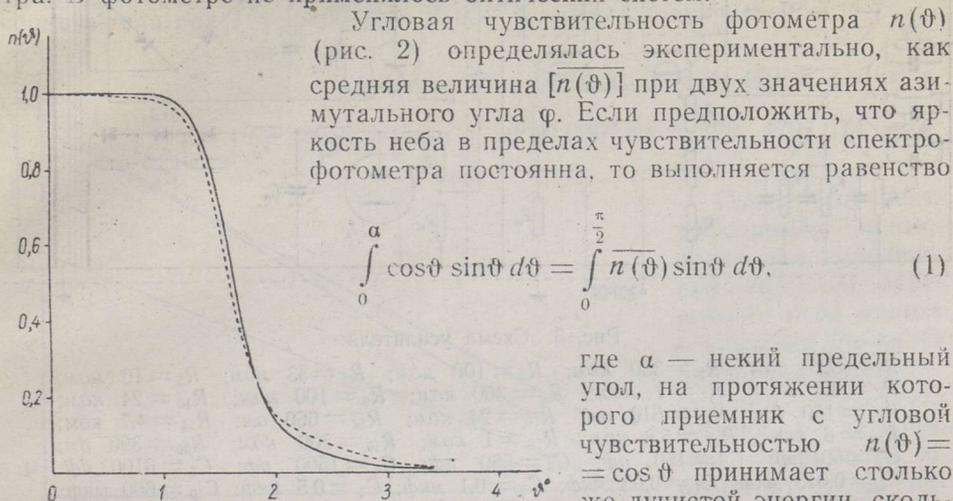


Рис. 2. Угловая чувствительность приемника — ϕ , — — — $\phi + 180^\circ$.

$$\int_0^\alpha \cos \theta \sin \theta d\theta = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \overline{n(\theta)} \sin \theta d\theta, \quad (1)$$

где α — некий предельный угол, на протяжении которого приемник с угловой чувствительностью $n(\theta) = \cos \theta$ принимает столько же лучистой энергии, сколько наш фотометр с данной угловой чувствительностью $\overline{n(\theta)}$ при значениях θ от 0 до $\frac{\pi}{2}$.

Выражение (1) дает

$$\alpha = \arcsin \left(2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \overline{n(\theta)} \sin \theta d\theta \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (2)$$

Соответственно эффективный угол зрения фотометра определяется выражением

$$\omega_{eff} = 2\pi \left[1 - \left(1 - 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \overline{n(\theta)} \sin \theta d\theta \right)^{\frac{1}{2}} \right]. \quad (3)$$

В данном случае $\omega_{eff} = 2,8 \cdot 10^{-3}$ стер.

Фототок ФЭУ-27 подается на усилитель, схема которого приведена на рис. 3. Девять пределов измерения позволяют изменять чувствительность системы всего в $7 \cdot 10^3$ раз. Усилитель имеет хорошую линейность во всех пределах измерения. Через 1,5 час после включения усилителя дрейф его нуля не превышает 0,2% от всей шкалы электронного потенциометра ЭПП-09М2 за час. Последний является регистратором усиленного фототока. Время пробега каретки всей шкалы применяемого потенциометра 1 сек.

Поворот приемника вокруг горизонтальной оси от горизонта до противоположного горизонта совершается автоматически при помощи азимутальной головки электрофотометра Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова [7]. После достижения горизонта затвор автоматически закрывается и записывается ноль системы.

Фотоумножитель питается от стабилизированного выпрямителя ВС-16 напряжением $900 \div 1300$ в.

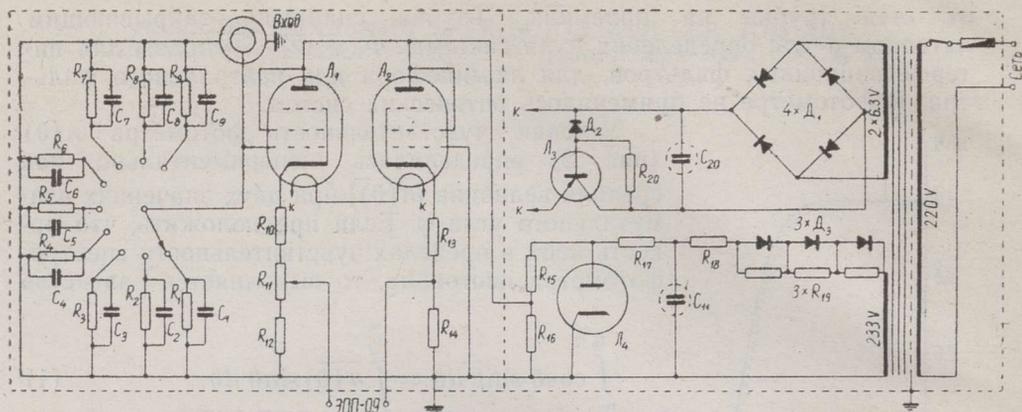


Рис. 3. Схема усилителя:

$R_1 = 820 \text{ мом}$; $R_2 = 330 \text{ мом}$; $R_3 = 100 \text{ мом}$; $R_4 = 33 \text{ мом}$; $R_5 = 10 \text{ мом}$;
 $R_6 = 3,3 \text{ мом}$; $R_7 = 1 \text{ мом}$; $R_8 = 300 \text{ ком}$; $R_9 = 100 \text{ ком}$; $R_{10} = 24 \text{ ком}$;
 $R_{11} = 150 \text{ ом}$; $R_{12} = 510 \text{ ом}$; $R_{13} = 24 \text{ ком}$; $R_{14} = 660 \text{ ом}$; $R_{15} = 4,7 \text{ ком}$;
 $R_{16} = 60 \text{ ком}$; $R_{17} = 5,8 \text{ ком}$; $R_{18} = 1 \text{ ком}$; $R_{19} = 200 \text{ ком}$; $R_{20} = 390 \text{ ом}$;
 $C_1 = 60 \text{ пф}$; $C_2 = 150 \text{ пф}$; $C_3 = 560 \text{ пф}$; $C_4 = 1500 \text{ пф}$; $C_5 = 6100 \text{ пф}$;
 $C_6 = 0,015 \text{ мкф}$; $C_7 = 0,05 \text{ мкф}$; $C_8 = 0,1 \text{ мкф}$; $C_9 = 0,5 \text{ мкф}$; $C_{10} = 600 \text{ мкф}$;
 $C_{11} = 20 \text{ мкф}$; $D_1 - \text{ДГ}-125$; $D_2 - \text{Д810}$; $D_3 - \text{Д7Е}$; $L_1, L_2 - 6\text{Ж1П}$; $L_3 - \text{ПЗБ}$;
 $L_4 - \text{СГЗС}$.

Линейность всей измерительной системы определялась нейтральными фильтрами в монохроматическом потоке излучения. Результаты показывают, что нелинейность системы не превышает 0,5%.

Чувствительность фотометра проверялась во время наблюдений через каждые 30—40 мин путем измерения яркости люминофора постоянного действия. Предварительно было изучено влияние температуры на яркость люминофора. В рассматриваемом промежутке температур (от 0 до 25°С) никаких изменений не было обнаружено. В течение всего периода измерений (около 4 месяцев) регулярно сравнивалась яркость люминофора с яркостью лампы накаливания. Лампа, искусственно состаренная и рассчитанная на питание 6 в, питалась напряжением $4,0300 \pm 0,0002 \text{ в}$, измеряемом на цоколе лампы потенциометром постоянного тока Р375. Расхождение результатов сравнений не превышало $\pm 1\%$ и имело при этом несистематический характер.

Фотометр градуировался в абсолютных единицах энергии по прямой радиации Солнца методом, базирующимся на известной формуле Бугера. Для этого выбирали безоблачные дни с практически постоянной прозрачностью атмосферы. Критерием выполняемости этого требования служили измерения прямой радиации Солнца термоэлектрическим актинометром во время калибровки. Для ослабления потока лучистой энергии применялся нейтральный фильтр, спектральное пропускание которого определялось путем сравнения его в монохроматическом потоке излучения с нейтральным фильтром НС-12 из комплекта цветного стекла. На рис. 4 изображены калибровочные кривые одного дня. На горизонтальной оси отложена масса атмосферы, на вертикальной — логарифм показания прибора. Калибровочные кривые экстраполировали до $m = 0$ и сопоставили с данными прямой радиации Солнца за пределами атмосферы в соответствующих областях спектра по Джонсону [8].

Спектрофотометрирование проводилось в трех спектральных областях, выделенных при помощи интерференционных фильтров. Пропускание интерференционных фильтров определялось на спектрофотометре

СФ-4. Там же определялась спектральная чувствительность ФЭУ-27 $k(\lambda)$, причем в качестве неселективного приемника был использован вакуумный термоэлемент с окном из КВг. Функция $k(\lambda)$ изображена на рис. 5. Эффективные длины волны, вычисленные для излучения абсолютно черного тела при $T' = 5400^\circ \text{K}$ и $10\,000^\circ \text{K}$, были следующие:

$$\lambda_{\text{eff}} \text{ (при } T' = 5400^\circ \text{K)} = 424, 479, 573 \text{ мкм,}$$

$$\lambda_{\text{eff}} \text{ (при } T' = 10\,000^\circ \text{K)} = 422, 479, 574 \text{ мкм.}$$

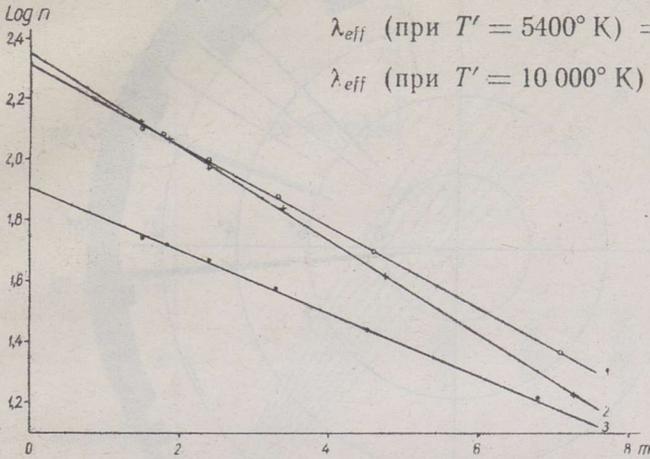


Рис. 4. Пример градуировочных кривых: 1 — $\lambda = 479$ мкм; 2 — $\lambda = 422$ мкм; 3 — $\lambda = 574$ мкм.

Описанный спектрофотометр применялся для определения яркостей сумеречного неба вблизи г. Тарту на площадке актинометрической станции Института физики и астрономии. Закрытость горизонта места наблюдений изображена на рис. 6. Высота места наблюдений 80 м над уровнем моря.

Измерения осуществлялись непрерывной записью в плоскости вертикали и противовертикали Солнца, а также в перпендикулярной им плоскости. Во время каждого сумерек применялись два интерференционных фильтра. Измерения производились попеременно с фильтрами $\lambda_{\text{eff}} = 422$ и 479 мкм или $\lambda_{\text{eff}} = 422$ и 574 мкм. Для непрерывного прохождения от горизонта вертикали Солнца до горизонта противовертикали Солнца требовалось 45 сек. Таким образом, распределение яркостей в данной области спектра получилось в среднем через каждые две минуты. Через каждые 15—20 мин обоими фильтрами определялось распределение яркостей в плоскости, перпендикулярной вертикали Солнца.

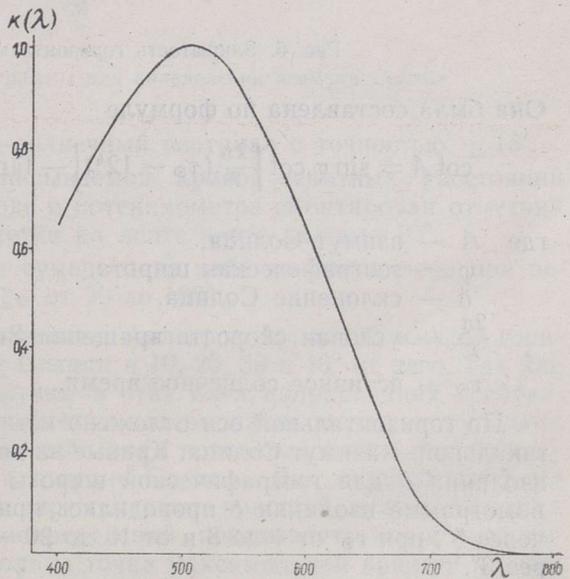


Рис. 5. Спектральная чувствительность ФЭУ-27.

Азимут Солнца для каждого момента времени определялся по соответствующей номограмме. Общий вид номограммы показан на рис. 7.

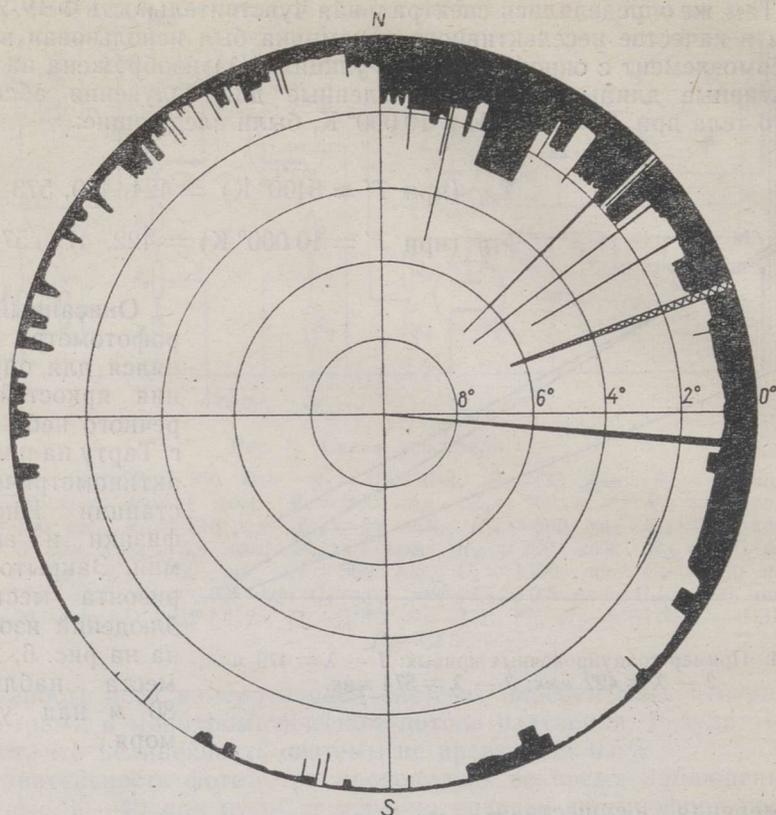


Рис. 6. Закрытость горизонта места наблюдений.

Она была составлена по формуле

$$\cot A = \sin \varphi \cot \left[\frac{2\pi}{T} (\tau_{\odot} - 12^h) \right] - \tan \delta \frac{\cos \varphi}{\sin \left[\frac{2\pi}{T} (\tau_{\odot} - 12^h) \right]}, \quad (6)$$

где A — азимут Солнца,
 φ — географическая широта,
 δ — склонение Солнца,
 $\frac{2\pi}{T}$ — угловая скорость вращения Земли,
 τ_{\odot} — истинное солнечное время.

По горизонтальной оси отложено истинное солнечное время, по вертикальной — азимут Солнца. Кривые на номограмме представляют собой изолинии δ для географической широты г. Тарту. На использованной номограмме изолинии δ проводились при τ_{\odot} от 23 до 1 и от 11 до 13 через 6° , при τ_{\odot} от 4 до 8 и от 16 до 20 через 1° , в остальной части через 3° .

При определении значений A по номограмме надо учитывать, что если соответствующие значения нанесены цифрами в кружках, то δ следует взять с противоположным знаком, причем значения A нанесены тоже цифрами в кружках. На правом конце оси абсцисс имеется дополнительная часть значений τ_{\odot} . Ею нужно воспользоваться в случае, если определены A для этих τ_{\odot} по основной части оси абсцисс оказывается невозможным, например, если $\tau_{\odot} = 17,30$, $\delta = +21^\circ$.

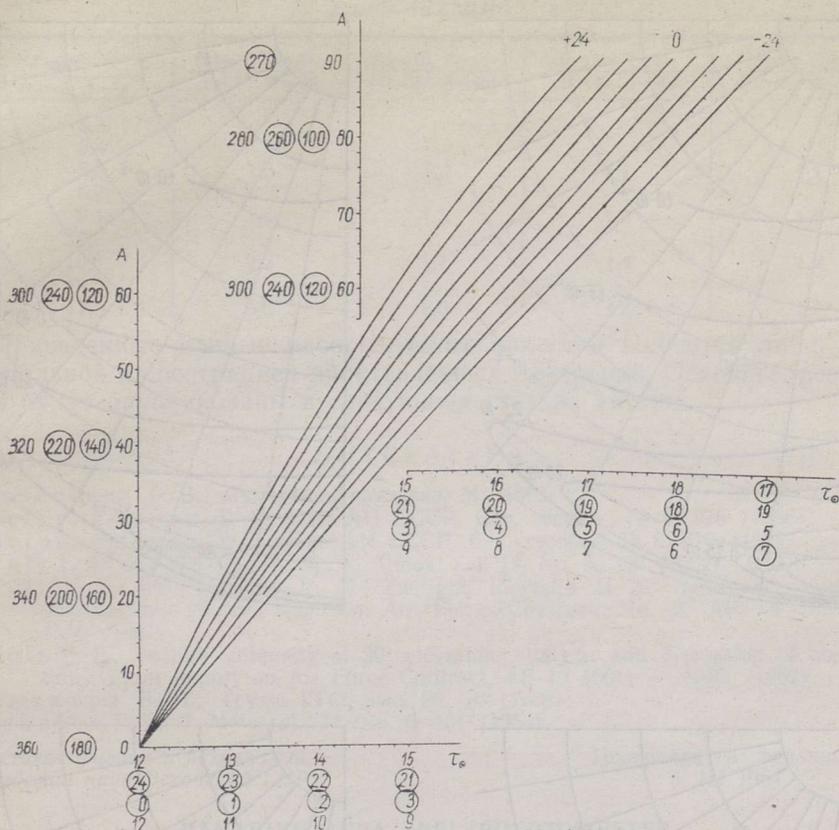


Рис. 7. Общий вид номограммы для определения азимута Солнца.

Фотометр нацеливался на солнечный вертикал с точностью $\pm 15'$.

Для фиксирования на записываемой кривой зенитных расстояний измеряемых точек на небосводе в потенциометре смонтирован отметчик реперных точек, дающий отметки на ленте через каждые 10° .

Спектрофотометрирование сумеречного неба производилось при зенитных расстояниях Солнца ζ_\odot от 90° до 100° .

Были сделаны также измерения с фильтром $\lambda_{eff} = 422$ мк от горизонта до зенита по вертикалу Солнца и $10, 20, 30$ и 40° от него. Так как для получения яркостной картины в этих пяти направлениях требовалось в среднем 4 мин, то графическая интерполяция между отдельными моментами времени и точками небосвода позволила найти распределение яркостей на небосводе в стороне Солнца. Для иллюстраций на рис. 8 приведены некоторые карты изопот яркостей в $вт/см^2$ мк стер. Рассмотрение полученных распределений показывает, что с увеличением зенитного расстояния Солнца точка максимальной яркости на вертикали Солнца становится все светлее относительно зенита. Сначала (до $\zeta_\odot \approx 94^\circ$) этот процесс происходит довольно медленно. При значениях ζ_\odot приблизительно с 94 до $98-99^\circ$ отношение $I(z_{max}, A=0)/I(z=0, A=0)$ быстро растет, затем опять замедляется и при ζ_\odot около 100° можно заметить противоположный ход.

Если сравнить яркость в точках небосвода с определенным зенитным расстоянием при $A=0$ и $A=40^\circ$, то выясняется, что для больших z

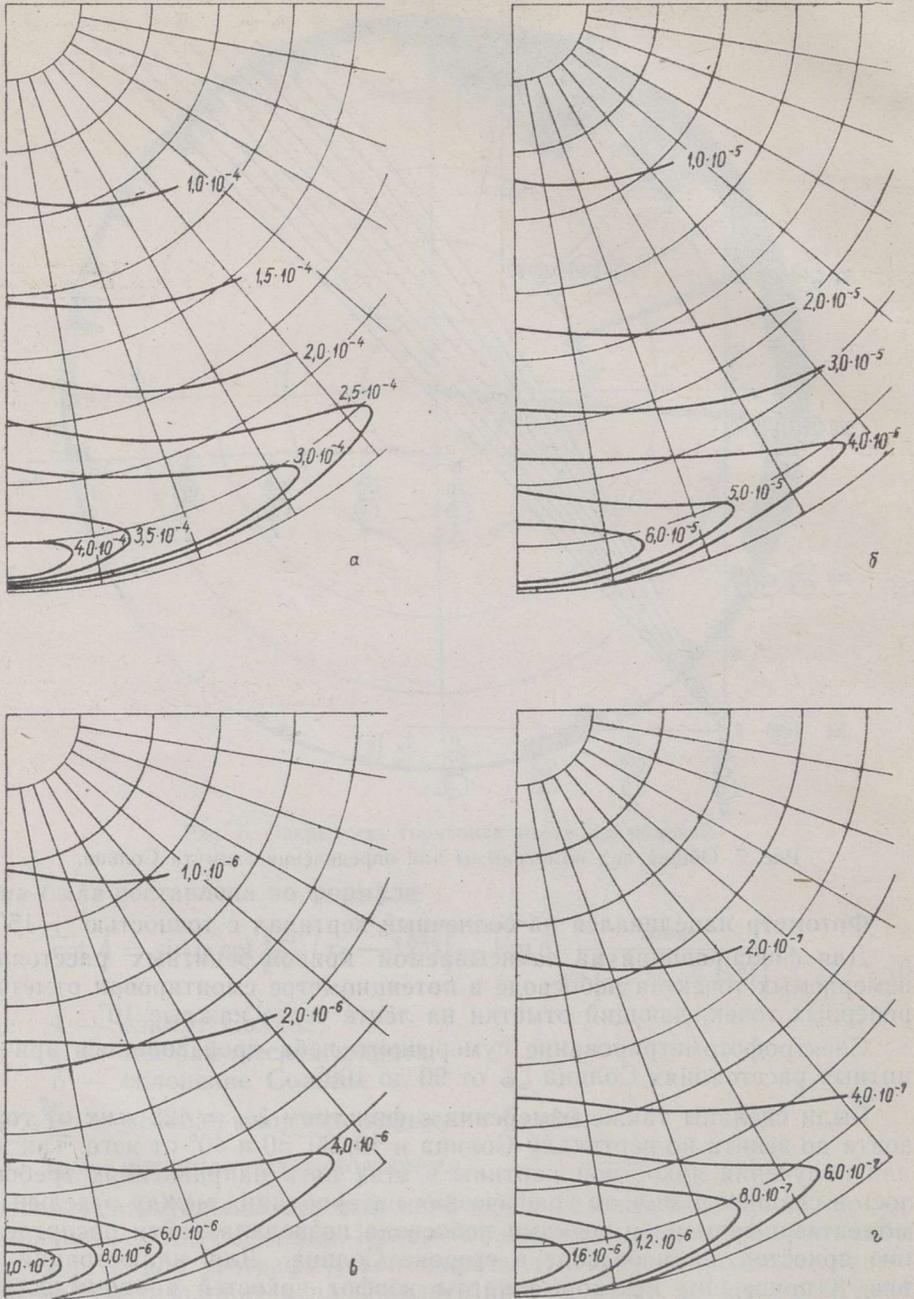


Рис. 8. Изофоты яркостей ($\lambda = 422$ мкм) при:

а — $\xi_{\odot} = 94^{\circ}$; б — $\xi_{\odot} = 96^{\circ}$; в — $\xi_{\odot} = 98^{\circ}$; г — $\xi_{\odot} = 100^{\circ}$.

отношение $I(z_0, A=0) / I(z_0, A=40)$ растет с увеличением ξ_{\odot} , для точек, расположенных ближе к зениту, оно проходит максимум при некотором значении ξ_{\odot} . Для характеристики вышесказанного приводятся в таблице некоторые отношения.

$$\lambda_{\text{eff}} = 422 \text{ мкк}$$

ζ_{\odot}	$\frac{I(z_{\text{max}}, A=0)}{I(z=0, A=0)}$	$\frac{I(z=80, A=0)}{I(z=80, A=40)}$	$\frac{I(z=60, A=0)}{I(z=60, A=40)}$	$\frac{I(z=40, A=0)}{I(z=40, A=40)}$	$\frac{I(z=20, A=0)}{I(z=20, A=40)}$
92	5,3				
93	5,4				
94	5,5	1,5	1,3	1,1	1,1
95	6,7				
96	9,1	1,8	1,5	1,3	1,2
97	12,7				
98	16,6	2,2	1,7	1,4	1,2
99	18,5				
100	17,5	3,6	2,0	1,2	1,1

Приведенные данные распределения яркостей являются лишь первоначальной иллюстрацией произведенных измерений. Основные результаты будут опубликованы в следующих статьях автора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Розенберг Г. В., Сумерки, Физматгиз, М., 1963.
2. Мегрелишвили Т. Г., Изв. АН СССР, Сер. геофиз., № 8, 976 (1956).
3. Мегрелишвили Т. Г., Изв. АН СССР, Сер. геофиз., № 6, 910 (1959).
4. Volz F. E. and Goody R. M., J. Atmos. Sci., 19, No. 5, 385 (1962).
5. Volz F. E. and Goody R. M., Twilight intensity at 20° elevation, results of observations, Scient. Rep. on Air Force Contract, No. 2, AF 19 (604) — 4546 (1961).
6. Volz F. E., Twilight intensity at 20° elevation, analysis and discussion of observations, Final Report on Air Force Contract, AF 19 (604) — 4546 (1962).
7. Мюхкюря В. И., Труды ГГО, вып. 93, 70 (1959).
8. Johnson F. S., J. Meteorol., 11, No. 6, 431 (1954).

Институт физики и астрономии
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию
6. III 1964

HÄMARIKUTAEGA SPEKTROFOTOMEETER

V. Põldmaa

Resüüme

Artiklis kirjeldatakse spektrofotomeetrit, mida kasutati hämarikutaeva heleduste jaotuse määramiseks Päikese vertikaalil ja temaga risti olevas tasandis. Kiirguse vastuvõtjana kasutati fotokordistajat ФЭУ-27. Fotovool võimendati eelvõimendajaga ja registreeriti elektronpotentsiomeetriga ЭПП-09М2. Fotomeeter kalibreeriti absoluutsetes energietilistes ühikutes. Mõõtmised teostati kolmes spektraalpiirkonnas: $\lambda_{\text{eff}} = 422, 479$ ja 574 мк Päikese seniitkaugustel $\zeta_{\odot} = 90-100^{\circ}$. Esitatakse heleduste jaotus taevasfääri päikese-poolisel osal spektraalpiirkonnas $\lambda_{\text{eff}} = 422 \text{ мк}$ Päikese seniitkaugustel $\zeta_{\odot} = 94, 96, 98$ ja 100° .

Eesti NSV Teaduste Akadeemia
Füüsika ja Astronoomia Instituut

Saabus toimetusse
6. III 1964

TWILIGHT SKY SPECTROPHOTOMETER

V. Põldmaa

Summary

A spectrophotometer used for measuring the brightness of twilight sky on the Sun's vertical and perpendicularly to it is described. The detector used was a photomultiplier ФЭУ-27. The photocurrent was amplified by a preamplifier and recorded by a self-compensating potentiometer ЭПП-09М2. The photometer was calibrated in absolute units of energy. The brightness was measured in spectral ranges $\lambda_{\text{eff}} = 422, 479$ and 574 мк , when the zenith distance of the Sun was $\zeta_{\odot} = 90-100^{\circ}$. The distribution of the sky brightness on the Sun's side of the hemisphere is given in the spectral range $\lambda_{\text{eff}} = 422 \text{ мк}$ by $\zeta_{\odot} = 94, 96, 98, 100^{\circ}$.

Academy of Sciences of the Estonian S.S.R.,
Institute of Physics and Astronomy

Received
March 6th, 1964