

Харченко Валерий Владимирович, доктор техн. наук, проф., гл. науч. сотр.

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Россия, Москва

Никитин Борис Андреевич, канд. техн. наук,

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Россия, Москва

Панченко Владимир Анатольевич, канд. техн. наук, доц. Российского университета транспорта, с. н. с. Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Россия, Москва

Тихонов Павел Валентинович, с. н. с. Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Россия, Москва

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ НАНОМЕТРИЧЕСКИХ ПОЛОС ВИДИМОЙ ЧАСТИ СОЛНЕЧНОГО СПЕКТРА

Аннотация: В статье рассмотрены параметры спектра стандартного солнечного излучения. Рассмотрены ультрафиолетовая, видимая и инфракрасная его части. Разработан алгоритм условного деления видимой части солнечного спектра по цветовой структуре. Проведена оценка основных параметров её цветовых полос. Рассчитаны параметры полос спектра (в том числе радужных) солнечного излучения в границах поглощения кремния. Мощность светового потока видимой части солнечного спектра составила 512 Вт/м² при мощности светового потока всего спектра 1000 Вт/м². К наиболее энергичным цветам солнечной радуги следует отнести оранжевый цвет с 22 % долевого вклада и зеленый цвет с 18,03 % долевого вклада в мощность видимого участка спектра.

Ключевые слова: солнечная энергия, спектр солнечного излучения, длина волны, цвета радуги, мощность светового потока.

Annotation: The article considers the parameters of the spectrum of standard solar radiation. Ultraviolet, visible and infrared parts are considered. An algorithm for the conditional division of the visible part of the solar spectrum by the color structure is developed. The main parameters of its color bands are evaluated. The parameters of the spectrum bands (including rainbow) of solar radiation within the absorption limits of silicon are calculated. The luminous flux power of the visible part of the solar spectrum was 512 W/m^2 , while the luminous flux power of the entire spectrum was 1000 W/m^2 . The most energetic colors of the solar rainbow include the orange color with 22 % share contribution and the green color with 18,03 % share contribution to the power of the visible part of the spectrum.

Keywords: solar energy, the spectrum of solar radiation, wavelength, rainbow colors, power of a light stream.

Спектр наземного солнечного излучения включает три основных диапазона длин волн: ультрафиолетовый, оптический, т.е. видимый невооруженным глазом человека, и инфракрасный [1].

На рисунке 1 представлен спектр стандартного солнечного излучения АМ 1,5 (1000 Вт/м^2) согласно директиве МЭК, изложенной в работе [2]. На этом рисунке выделен видимый участок спектра согласно работам [3] и [4], который охватывает диапазон длин волн от $0,38 \text{ мкм}$ до $0,76 \text{ мкм}$.

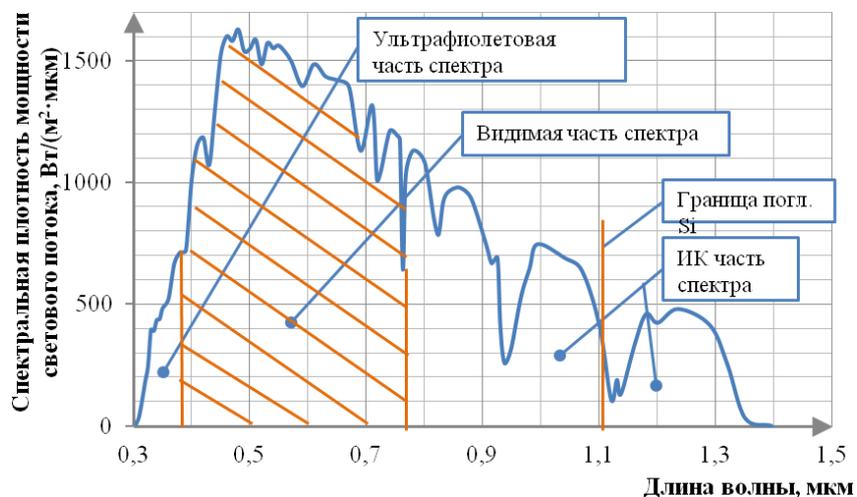


Рис.1. Спектр стандартного солнечного излучения АМ 1,5

Основной задачей настоящей работы является разработка алгоритма условного деления видимой части солнечного спектра по цветовой структуре и оценки основных параметров её цветowych полос.

По цветовому восприятию человека видимый участок солнечного спектра представляется в виде набора в определенной последовательности семи радужных (цветowych) полос.

Однако вопрос соответствия определенной длины волны фотона реперным значениям цвета полос, а также их диапазонов, не решен. Так фундаментальный справочник физических величин [1] ответа на поставленный вопрос не дает, не смотря на то, что стандартный солнечный спектр следует отнести к разряду фундаментальных физических величин.

Из анализа, представленного на рисунке спектра, следует, что он начинается ультрафиолетовым участком в диапазоне 0,3 – 0,38 мкм. Затем идет видимый участок спектра, который включает в себя область с максимальной энергетической плотностью светового потока, превышающей при соответствующих длинах волн величину 1,5 кВт/м²·мкм.

За ним с длин волн более 0,76 мкм следует участок спектра инфракрасного излучения.

Решение поставленной выше задачи представляется на базе условного деления видимого участка спектра на 12 полос в логарифмическом масштабе длин волн. Следует обратить внимание на то обстоятельство, что отношение длины волны верхней границы видимого участка спектра к его нижней границе составляет число 2 [3]. Из этого соотношения следует, что глаз человека способен различать (разделять) цветовую гамму размером в одну октаву. Поэтому условное деление видимого участка солнечного спектра можно проводить по аналогии с делением звуковых октав на тона и полутона, поскольку отношение частот соответствующих тонов двух соседних звуковых октав составляет число 2 [4].

При этом сумма семи тонов и пяти полутонов звуковой октавы составляет число 12. В математическом плане звуковые тона и полтона равносильны и отличаются друг от друга по частоте на один и тот же коэффициент K .

$$K = \sqrt[12]{2} = 1,05946 \quad (1)$$

Исходя из выше изложенного, видимый участок солнечного спектра следует делить на 12 полос в логарифмическом масштабе, т.е. отношение длин волн конца и начала каждой полосы должно соответствовать величине K выражения 1.

Результаты такого деления приведены в таблице 1.

Табл. 1. Параметры полос спектра (в том числе радужных) солнечного излучения в границах поглощения кремния

| № | Диап. длин волн полосы, λ_i | Шир. полосы, $\Delta\lambda_i$ | Сред. знач. длины волны в полосе | Мощ. свет. потока полосы | Энерг. доля полосы от всей вид. части | Визуал. оценка цвета полосы | Соотв. полос цветам радуги |  | Энерг. доля цветных полос радуги | Усред. знач. длины волны |
|----|-------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|---|----------------------------------|--------------------------|
| | мкм | | | | | | | | нм | нм |
| 1 | 380-402,6 | 22,6 | 391,3 | 15,83 | 3,09 | Фиолет. | Фиолет. | 8,59 | 402,6 | |
| 2 | 402,6-426,5 | 23,9 | 414,55 | 28,20 | 5,5 | Сине-фиол. | | | | |
| 3 | 426,5-451,9 | 25,4 | 439,2 | 31,65 | 6,17 | Синий | Синий | 15,45 | 452 | |
| 4 | 451,9-478,8 | 26,9 | 465,35 | 47,58 | 9,28 | Сине-голуб. | | | | |
| 5 | 478,8-507,3 | 28,5 | 493,05 | 46,86 | 9,13 | Голуб. | Голуб. | 9,13 | 493,05 | |
| 6 | 507,3-537,4 | 30,1 | 522,35 | 46,25 | 9,02 | Зелен. | Зелен. | 18,03 | 537 | |
| 7 | 537,4-569,4 | 32,0 | 553,35 | 46,19 | 9,01 | Зелен. | | | | |
| 8 | 569,4-603,2 | 33,8 | 586,3 | 43,37 | 8,46 | Желт. | Желт. | 8,46 | 586,3 | |
| 9 | 603,2-639,1 | 35,9 | 621,15 | 57,88 | 11,29 | Оранж. | Оранж. | 22,01 | 640 | |
| 10 | 639,1-677,1 | 38,0 | 658,1 | 54,95 | 10,72 | Оранж.-красн. | | | | |
| 11 | 677,1-717,3 | 40,2 | 697,2 | 46,39 | 9,05 | Красн. | Красн. | 18,29 | 717,3 | |
| 12 | 717,3-760 | 42,7 | 738,65 | 47,38 | 9,24 | Темнокрасн. | | | | |
| Σ | | | | 512,53 | 100 | | | | | |

Из анализа представленных в ней данных следует, что ширина полос при таком делении не постоянна. Она постепенно возрастает с величины 22,6 нм в начале видимой части спектра до 42,7 нм в её конце. Мощность светового потока видимой части солнечного спектра составляет 512 Вт/м² при мощности светового потока всего спектра 1000 Вт/м² [2; 5; 6; 7].

В таблице представлены также энергетические доли вклада каждой из 12 полос светового ряда, средняя величина которых составляет 9 - 10 % от мощности светового потока видимой части спектра. Исключение составляют полосы в области коротких длин волн (от 0,38 нм до 0,44 нм), доля которых в реальном солнечном спектре достаточно низка.

Для каждой из 12 полос видимой части солнечного спектра проведена визуальная оценка её цвета с помощью монохроматора МДР-23 ЛОМО. Условное деление видимого участка спектра на семь цветов радуги проведено аналогично условному делению звуковой октавы на семь тонов. К наиболее энергичным цветам солнечной радуги следует отнести оранжевый цвет с 22 % долевого вклада и зеленый цвет с 18,03 % долевого вклада в мощность видимого участка спектра.

Библиографический список:

1. Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. и др. Физические величины. Справочник Москвы. Энергоатомиздат, 1991 г., 1232 с.
2. Bird R.E., Hulstrom R.L., Lewis L.J. Terrestrial Solar Spectral, data Sets. Solar Energy, vol. 30, № 6, 1983, p 563-573.
3. Беленов А.Т., Метлов Г.Н. Солнечные фотоэлектрические водоподъемники, под редакцией академика РАСХН Стребкова Д.С., ГНУ ВИЭСХ, Москва, 2008 г. с. 7.
4. Путилов К.А. Курс физики, Физматгиз, 1962 г., с. 288.
5. Никитин Б.А., Майоров В.А., Харченко В.В. Исследование спектральных характеристик солнечного излучения для различных величин атмосферных масс. Вестник ВИЭСХ, 2015, № 4 (21), с. 95-105.

6. Никитин Б.А., Майоров В.А., Харченко В.В. Влияние величины атмосферной массы на спектральную интенсивность солнечного излучения. Энергетика і автоматика, 2015, № 4 (26), с. 54-65.

7. Kharchenko V., Nikitin B., Tikhonov P., Panchenko V. & Vasant P. Evaluation of the Silicon Solar Cell Modules. Intelligent Computing & Optimization. Advances in Intelligent Systems and Computing, Volume 866, Springer Nature Switzerland AG 2019. Pandian Vasant, Ivan Zelinka, Gerhard-Wilhelm Weber (Eds.): ICO 2018, pp 328 – 336. doi.org/10.1007/978-3-030-00979-3_34.