ИССЛЕДОВАНИЕ СОЛНЦА НА ПИКЕ ТЕРСКОЛ

К. А. Бурлов-Васильев, И. Э. Васильева

Главная астрономическая обсерватория НАН Украины
улю Академика Заболотного, 27, 03680 Киев, Украина
e-mail: vasil@mao.kiev.ua

На протяжении 1980–1990 гг. на пике Терскол на телескопах СЭФ-1 и АЦУ-26 велись регулярные наблюдения спектра солнечного диска и активных солнечных образований. Исследования на телескопе СЭФ-1 проводились в рамках программы "Распределение энергии в спектре Солнца в абсолютных энергетических единицах". На телескопе АЦУ-26 проводились параллельные наблюдения для уточнения тонкой структуры теллурических линий и исследовалась вспышечная активность. В работе описана процедура наблюдений, приведены результаты исследований, распределение энергии в спектре центра диска Солнца в абсолютных энергетических единицах.

SOLAR INVESTIGATION AT TERSKOL PEAK, Burlov-Vasiljev K. A., Vasiljeva I. E. – During 1980–1990 regular observations of the solar disk spectrum and active solar structures were carried out with SEF-1 and ATsU-26 telescopes at Terskol Peak in the framework of the program "Energy distribution in the solar spectrum in absolute energy units". In order to refine the fine structure of telluric lines, observations with ATsU-26 telescope were carried out in parallel. This telescope was also used for the investigation of the solar active structures. In this paper the observational technique is described. The obtained results and energy distribution in the solar disk center in absolute energy units are presented.

ВВЕДЕНИЕ

Пик Терскол на Северном Кавказе, на котором расположена обсерватория МЦ АМЭИ (до 1992 г. – высокогорная наблюдательная база ГАО НАН Украины), представляет собой плоский лавовый гребень на одном из южных склонов горы Эльбрус. Его средняя высота над уровнем моря равна 3100 м. Регулярные астрономические и астроклиматические измерения (как дневные, так и ночные) проводятся здесь с 1972 г. Было установлено, что низкая относительная влажность воздуха над пиком Терскол позволяет эффективно проводить исследования в достаточно широком диапазоне спектра [10]. Кроме того, при удовлетворительном количестве солнечных дней (16–18 за месяц в летний и осенний периоды) на пике Терскол часто наблюдаются дни с исключительно высокой прозрачностью, стабильной в течение первой половины дня [7, 15, 20, 29, 30]. Дрожание изображения при апертуре инструмента позволяет вести регулярные наблюдения с пространственным разрешением не хуже $5''$. Закрытие горизонта в западном и восточном направлении не превышает 8°, что дает возможность наблюдать Солнце вплоть до 7 воздушных масс. Это и позволило в начале 1980-х годов начать на пике Терскол планомерные исследования по распределению энергии в спектре Солнца в абсолютных энергетических единицах.

До сих пор наиболее широко цитируются данные об абсолютном распределении энергии в спектре Солнца, опубликованные Неккелем и Лабсом [8] и основанные на наземных измерениях, полученных в 1962–1964 гг. [1]. Результаты Неккеля и Лабса считаются наиболее надежными, несмотря на то, что уже в 1967 г. практически все последующие измерения были вынесены в верхние слои атмосферы. Была осуществлена программа измерений с борта исследовательского самолета в эксперименте "Галилео" Арвезеном [2] и одновременно группой Текекары [3, 4] на высоте 11.6–12.5 км. Позднее измерения проводились с баллонов и ракет на высоте около 30 км (Шоу и Фрелих [5], Шоу [6] и Верли [19]). В этом случае авторы использовали упрощенную схему измерений при помощи узкополосных фильтровых фотометров. Таким образом, им удалось добиться повышения надежности измерений, пожертвовав спектральным разрешением. Первая попытка измерений абсолютного спектра Солнца с борта космического аппарата "Spacelab-1", предпринятая в 1983 г., оказалась неудачной из-за неконтролируемого изменения пропускания оптики во время полета [11]. Авторы приводят данные лишь для ультрафиолета ($\lambda\lambda$ 200–358 нм), где погрешность результата, по их оценке, не превысила 5 %. В монографии Макаровой, Харитонова и Казачевской [17] представлен сводный ряд данных ($\lambda\lambda$ 340–1060 нм), полученный по наиболее надежным измерениям, причем в качестве критерия надежности были привлечены результаты фотометрии звезд – солнечных аналогов в Аризонской 13-цветной системе Джонсона и Митчелла. Авторы выделили три "лучших" по их мнению ряда измерений – Неккеля и Лабса [8], Арвезена [2] и ряд, составленный на основе измерений с солнечными фотометрами (Шоу [6], Шоу и Фрелих [5]). Расхождения между различными рядами достигают величины 4 %. По мнению авторов, не существует ряд измерений, способный претендовать на погрешность по крайней мере 2 %.

В связи с вышесказанным возникла необходимость создания единого абсолютного ряда измерений солнечного спектра в абсолютных энергетических единицах с погрешностью не хуже 2 %. В настоящей работе представляются результаты исследований, основанные на наблюдениях 1989–1995 гг. с помощью комплексов СЭФ-1 и АЦУ-26. При проведении эксперимента особенное внимание было уделено факторам, способным вносить погрешности при абсолютных измерениях спектра Солнца.

Инициатором установки солнечных телескопов на пике Терскол, непосредственным руководителем, исполнителем и наблюдателем был д.ф.-м.н. Э. А. Гуртовенко. В разные годы в наблюдениях на солнечных телескопах принимали участие сотрудники ГАО НАН Украины Э. А. Гуртовенко, В. И. Троян, К. В. Аликаева, Ю. Б. Матвеев, С. Н. Осипов, К. А. Бурлов-Васильев, И. Э. Васильева, Ю. М. Гаврилюк, В. В. Кульбеда, А. В. Андриенко, В. Д. Поросюк.

МАЛЫЙ ГОРИЗОНТАЛЬНЫЙ СОЛНЕЧНЫЙ ТЕЛЕСКОП СЭФ-1 И ОРЕОЛЬНЫЙ ФОТОМЕТР

Комплекс СЭФ-1 включает горизонтальный солнечный телескоп, дифракционный спектрометр, систему воспроизведения, контроля и передачи единиц спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) государственного специального эталона СССР, систему регистрации, обработки и хранения данных, ореольный фотометр, вспомогательную аппаратуру для исследования и контроля оптических параметров схем измерения [9, 12, 13, 14, 16, 21]. В качестве носителя шкалы спектральной плотности энергетической яркости используются ленточные вольфрамовые лампы. Сравнение потоков от Солнца и стандартного источника проводится в процессе наблюдений. При регистрации сигнала от лампы в оптическую схему вводится дополнительное сферическое зеркало–коллиматор.

Система регистрации, обработки и хранения данных создана на основе микроЭВМ ЦЛАНП-0270. Используемый тип микропроцессора – MOTOROLA 6800, объем ОЗУ – 32 Кбайт, стандартный набор периферийных устройств – буквенно-цифровой дисплей, АЦПУ, два накопителя на ГМД ЕС 5074, два минилентовых накопителя СМ 5300.01, стойка КАМАК. К микроЭВМ подключен цветной графический дисплей для отображения сканируемого спектра. Через крейт КАМАК система связана с блоком управления шаговым двигателем сканирующей каретки и с каналом регистрации сигнала, поступающего от приемника излучения.

Ореольный фотометр. Параллельно с основными измерениями в течение дня состояние атмосферы контролируется по величине околосолнечного ореола с помощью двухканального ореольного фотометра [15, 20].

Наблюдения на СЭФ-1. Процедура наблюдений заключается в многократном сканировании спектра Солнца. В зависимости от решетки размер рабочего участка спектра составляет от 50 до 200 нм. На протяжении дня наблюдается от одного до трех спектральных участков. Количество спектральных сканов может достигать 100–120. Абсолютная калибровка спектра проводится обычно в полдень – до двадцати спектральных сканов. Количество отчетов в скане – до 10 000. Информация накапливается на гибких магнитных дисках и магнитной ленте.

БОЛЬШОЙ ГОРИЗОНТАЛЬНЫЙ СОЛНЕЧНЫЙ ТЕЛЕСКОП (БГСТ) АЦУ-26

БГСТ АЦУ-26 предназначен для спектральных фотоэлектрических и фотографических измерений спокойных и активных образований в атмосфере Солнца [24, 26]. Используемые приемники излучения позволяют проводить наблюдения в диапазоне длин волн от 0.3 мкм до 1.2 мкм со спектральным разрешением до 300 000. Телескоп горизонтального типа, фокусное расстояние главного сферического зеркала составляет 17 746 мм, диаметр равен 650 мм.

Управление сканированием осуществляется программно-аппаратным комплексом, построенным на основе IBM PC AT 386, модульного стандарта КАМАК и специализированного блока управления шаговым двигателем. Блок управления позволяет также работать в режиме ручного управления с передней панели блока. Выходной сигнал электрометрического усилителя поступает на блок 12-битового аналого-цифрового преобразователя CAD-20 или 10-битового АЦП 712 (время пробразования 24 мкс) и после оцифровки запоминается в оперативной памяти PC. В конце скана информация записывается на жесткий магнитный диск.

Измерения спектра центра солнечного диска на АЦУ-26. Фотоэлектрические измерения спектра Солнца на БГСТ АЦУ-26 в первую очередь направлены на поддержку программы абсолютных энергетических спектральных измерений, выполняемых на специализированном телескопе СЭФ-1. Абсолютные спектральные измерения выполняются с низким спектральным разрешением порядка 0.1 нм. В ближней ультрафиолетовой и видимой областях спектра для редукции измерений за атмосферное ослабление используется классический метод Бугера. В инфракрасной области применение метода Бугера в сочетании с низким спектральным разрешением некорректно вследствие эффекта Форбса, вызванного поглощением в узких теллурических линиях земной атмосферы (в основном кислорода и паров воды). Поэтому, чтобы получить спектр Солнца, свободный от влияния теллурических линий, необходимо, опираясь на модельные представления, рассчитать теллурический спектр поглощения на момент наблюдений. Сравнение такого расчета с реальными наблюдениями может быть выполнено для некоторых участков спектра, содержащих только теллурические линии (при высоком спектральном разрешении).

С этой целью на телескопе АЦУ-26 было измерено более 6 000 линий водяного пара и около 650 линий кислорода для различных воздушных масс и метеоусловий. Обычно в течение одного наблюдательного дня регистрировался избранный диапазон длин волн в четвертом или пятом порядке спектра длиной соответственно 7 или 4 нм. Время сканирования составляло 2–3 минуты. В течение дня записывалось до 100 сканов солнечного спектра, причем частота сканирования определялась либо скоростью изменения воздушной массы в направлении на Солнце, либо изменением метеоусловий. Таким образом, наблюдения дают возможность проследить динамику поглощающих компонентов земной атмосферы в течение дня.

Обработка полученного материала может быть проведена непосредственно после окончания дневного цикла наблюдений на IBM PC, входящей в состав программно-аппаратного комплекса телескопа АЦУ-26.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Нами получен оригинальный ряд измерений энергетических характеристик солнечного излучения (рис. 1). Данные опубликованы в виде 1 нм интервалов [22, 23, 25, 27, 28].

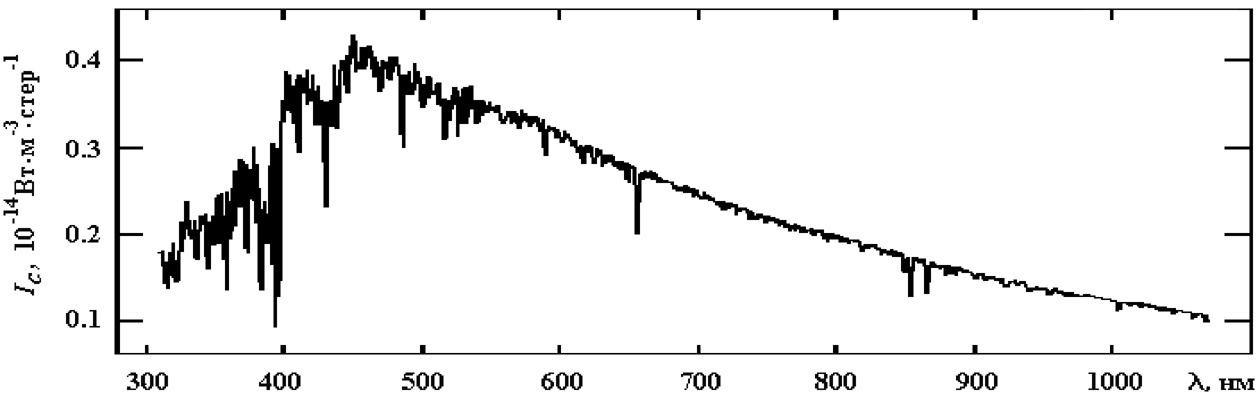
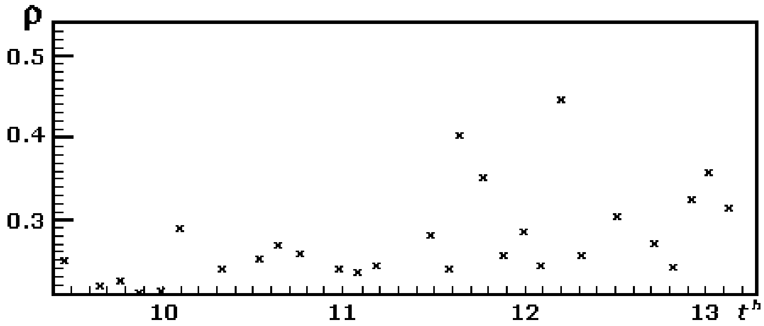


Рис. 1. Распределение энергии в спектре центра диска Солнца в абсолютных энергетических единицах

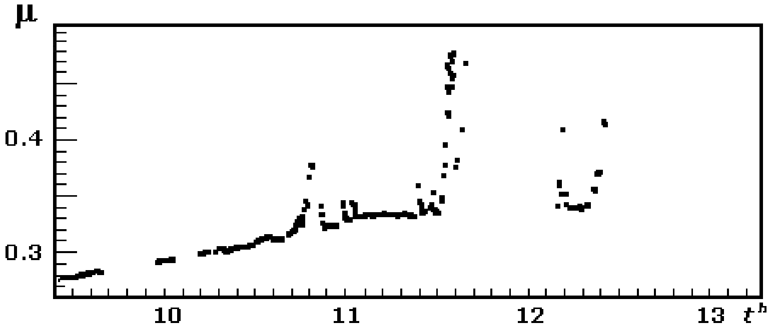
Итоговая величина погрешности определения СПЭЯ центра солнечного диска в спектральной области 310–400 нм не превышает 2.6 %, в 400–685 нм – 2.5–2.3 %, 685–1050 нм – 2 %.

ВЫВОДЫ

Атмосфера над пиком Терскол. Наблюдения (АЦУ-26) показывают, что содержание водяного пара над пиком Терскол в летне-осенний период в ясные дни составляет в среднем 2–6 мм осажденной воды в расчете на одну воздушную массу.



а



б

Рис. 2. Изменение содержания водяного пара в первой половине дня 6.02.1994 в зависимости от местного времени (*а*) (по оси y – содержание водяного пара в см осажденного слоя при перерасчете на единичную воздушную массу) и ход относительного солнечного ореола по наблюдениям на солнечном фотометре (*б*)

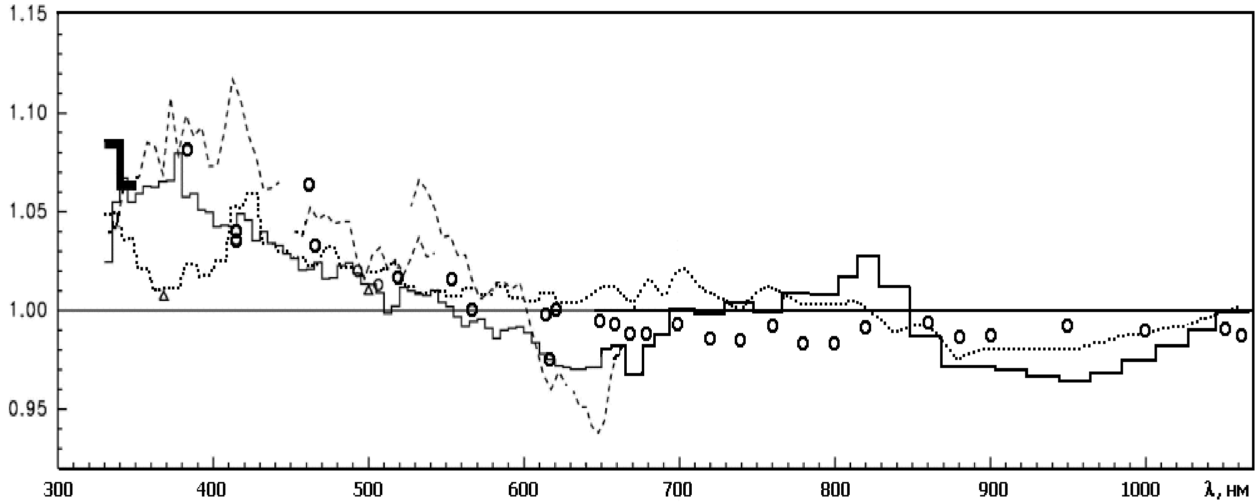


Рис. 3. Отношение величин спектральной освещенности солнечным излучением к аналогичным данным Неккеля и Лабса [8]; сплошная линия – наши данные, точки – данные Макаровой, Харитонова, Казачевской [17], кружки – фотометрические измерения Шоу, Фрелих [5] и Шоу [6], пунктир – данные Локвуда и др. [18], жирная линия – результаты ультрафиолетовых измерений на борту “Spacelab-1” [11], треугольники – балонные измерения Верли [19]

Динамика поведения аэрозоля и водяного пара над пиком Терскол в течение дня существенно подобна. Состояние высокой оптической стабильности атмосферы отмечается в утренние часы от восхода Солнца до 10–11 часов местного времени. Этот промежуток характеризуется как стабильностью рассеивающих свойств атмосферного аэрозоля, так и стабильным содержанием водяного пара. В дальнейшем наблюдается резкий рост содержания аэрозоля и водяного пара. Такая взаимосвязь позволяет сделать вывод о водной природе основной массы аэрозоля над пиком Терскол (рис. 2).

Распределение энергии в спектре Солнца. Есть расхождение между результатами наших измерений и общепринятыми данными Неккеля и Лабса [8], особенно в ультрафиолете (рис. 3). С другой стороны, согласие между нашими данными и средними данными Макаровой, Харитонова и Казачевской [17], которые опираються на результаты звездной многоцветной фотометрии, является аргументом при выборе лучшего ряда. Спектрофотометрические измерения солнечного излучения, даже вынесенные в космос, вряд ли способны предоставить дополнительные аргументы в пользу того или иного ряда или существенным образом снизить погрешность измерений, поскольку в лучшем случае предполагают использование тех же лабораторных стандартов излучения, что и в наземных измерених, тем более, что наземные измерения обладают гораздо большими возможностями точной калибровки.

[1] *Labs D., Neckel H.* The Radiation of the Solar Photosphere from 2000 A to 100 m // Zeitschrift fur Astrophysik.–1968.–**69**, N 1.–P. 1–73.

[2] *Arvesen J. C., Griffin R. N., Pearson B. D.* Determination of Extraterrestrial Solar Spectral Irradiance from a Research Aircraft // Appl. Opt.–1969.–**8**.–P. 2215–2231.

[3] *Thekaekara M. P., Kruger R., Duncan C. H.* Solar irradiance measurements from a research aircraft // Appl. Opt.–1969.–**8**.–P. 1713–1732.

[4] *Thekaekara M. P.* Extraterrestrial Solar Spectrum, 3000–6100 A at 1–A Intervals // Appl. Opt.–1974.–**13**, N 3.–P. 518–522.

[5] *Shaw G. E., Frohlich C.* The Variability and Absolute of Solar Spectral Irradiance // Solar-terrestrial Influences on Weather and Climate / Eds B. M. McCarmac, T. A. Seliga, 1979.–P. 69–73.

[6] *Shaw G. E.* Solar Spectral Irradiance and Atmospheric Transmission at Mauna Loa Observatory // Appl. Opt.–1982.–**21**.–P. 2006–2011.

[7] *Троян В. И.* Некоторые характеристики дневного астроклимата пика Терскол // Астрометрия и астрофизика.–1982.–Вып. **47**.–С. 80–83.

[8] *Neckel H., Labs D.* The Solar Radiation between 3300 and 12500 A // Solar Phys.–1984.–**90**.–P. 205–258.

[9] *Матвеев Ю. Б.* Исследование образцовых средств измерений спектральной плотности энергетической яркости // Кинематика и физика небес. тел.–1985.–**2**, № 3.–С. 74–76.

[10] *Бурлов-Васильев К. А., Гуртовенко Э. А., Троян В. И.* Интегральный спектр Солнца как звезды в УФ (0.1–0.32 мкм) и ИК (1–50 мкм) областях // Кинематика и физика небес. тел.–1986.–**2**, № 4.–С. 3–10.

[11] *Labs D., Neckel H., Simon P. C., Thuiller G.* Ultraviolet Solar Irradiance Measurement from 200 to 358 nm during Spacelab–1 Mission // Solar Phys.–1987.–**107**, N 2.–P. 203–219.

[12] А. с. №131187СССР. Штора для регулирования степени пропускания цветового потока / *Беспалько В. Г., Матвеев Ю. Б., Мельников М. А., Троян В. И.*–Опубл. 1987.

[13] *Бурлов-Васильев К. А., Гуртовенко Э. А., Матвеев Ю. Б., Троян В. И.* Абсолютная спектрофотометрия Солнца. I. Постановка задачи и метод решения // Кинематика и физика небес. тел.–1990.–**5**, № 2.–С. 33–37.

[14] *Бурлов-Василъев К. А., Матвеев Ю. Б., Троян В. И. и др.* Абсолютная спектрофотометрия Солнца. II. Специализированный наблюдательный комплекс СЭФ-1 // Кинематика и физика небес. тел.–1990.–**6**, № 2.–С. 38–43.

[15] *Бурлов-Васильев К. А., Васильева И. Э., Матвеев Ю. Б.* Оптическая стабильность земной атмосферы на пике Терскол по измерениям околосолнечного ореола // Кинематика и физика небес. тел.–1990.–**6**, № 6.–С. 83–86.

[16] *Бурлов-Васильев К. А., Кульбеда В. В.* Абсолютная спектрофотометрия Солнца. III. Система автоматизации телескопа СЭФ-1 // Кинематика и физика небес. тел.–1991.–**7**, № 1.–С. 72–77.

[17] *Макарова Е. А., Харитонов А. В., Казачевская Т. В.* Поток солнечного излучения.– М.: Наука, 1991.–400 с.

[18] *Lockwood G. W., Tug H., White N. M.* A new solar irradiance calibration from 3295 A to 8500 A derived from absolute spectrophotometry of Vega // Astrophys. J.–1992.–**390**, N 2.–P. 668–678.

[19] *Wehrli Ch.* Solar spectral irradiance measurements with sunphotometers // Solar Electromagnetic Radiation Study for Solar Cycle 22: Proc. of the Workshop.–1992.–P. 54–61.

[20] *Бурлов-Васильев К. А., Васильева И. Э.* Спектральная прозрачность земной атмосферы в области ближнего ультрафиолета // Изв. АН. Физика атмосферы и океана.–1992.–**28**. № 12.–С. 1170–1175.

[21] *Матвеев Ю. Б., Гаврилюк Ю. М.* О поляризующем действии отражательных дифракционных решеток // Кинематика и физика небес. тел.–1993.–**9**, № 3.–С. 91–96.

[22] *Burlov-Vasiljev K. A., Gurtovenko E. A., Matvejev Yu. B.* New absolute measurements of the solar spectrum 310–685 nm // Solar Phys.–1995.–**157**, N 1/2.–P. 51–73.

[23] *Бурлов-Васильев К. А., Васильева И. Э., Матвеев Ю. Б.* Новые измерения солнечного спектра в абсолютных энергетических единицах в спектральной области $\lambda\lambda$ 650–1070 нм // Кинематика и физика небес. тел.–1996.–**12**, №3.–С. 75–91.

[24] *Аликаева К. В., Бурлов-Васильев К. А., Васильева И. Э. и др.* Горизонтальный солнечный телескоп АЦУ-26 на Кавказе // Кинематика и физика небес. тел.–1996.–**12**, № 6.–С. 65–74.

[25] *Бурлов-Васильев К. А., Васильева И. Э., Матвеев Ю. Б.* Новый ряд данных об абсолютном распределении энергии солнечного излучения в области 310–1070 нм // Изв. ВУЗов. Радиофизика.–1996.–**39**, № 10.–С. 1242–1248.

[26] *Бурлов-Васильев К. А., Васильева И. Э., Гуртовенко Э. А., Матвеев Ю. Б.* Большой солнечный телескоп ГАО НАНУ на Кавказе // Изв. ВУЗов. Радиофизика.–1996.–**39**, № 10.–С. 1326–1334.

[27] *Burlov-Vasiljev K. A., Matvejev Yu. B., Vasiljeva I. E.* Results of the Solar Disk-center Spectral Intensity Measurements in the Range 310–1070 nm // Solar Analogs: Characteristics and Optimum Candidates: Proc. 2nd Lowell Fall Workshop (Flagstaff, Arizona, Oct. 5–7, 1997) / Ed. J. C. Hall.–1997.–P. 115–122.

[28] *Burlov-Vasiljev K. A., Matvejev Yu. B., Vasiljeva I. E.* New Measurements of the Solar Disk-center Spectral Intensity in the Near IR from 645 nm to 1070 nm // Solar Phys.–1998.–**177**, N 1/2.–P. 25–40.

[29] *Burlov-Vasilyev K., Terez E., Terez G., Vasilyeva I.* Determination of total ozone content from solar radiance measurements at the Terskol station // Phys. and Chem. Earth. Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere.–2000.–**25**, N 5–6.–P. 435–438.

[30] *Бурлов-Васильев К. А., Васильева И. Э., Терез Г. А., Терез Э. И.* Определение общего содержания озона по спектрофотометрическим наблюдениям Солнца в УФ-области спектра // Кинематика и физика небес. тел.–2000.–**16**, № 3.–С. 266–273.