

ПРИВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ ПОЛНОГО ПОТОКА ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА К ЕДИНОЙ ШКАЛЕ И НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ В ОЦЕНКЕ ЕГО ДОЛГОВРЕМЕННЫХ ТРЕНДОВ

А.В. Мордвинов

REDUCTION OF MEASUREMENTS OF TOTAL SOLAR FLUX TO UNIFIED SCALE AND UNCERTAINTY IN ESTIMATION OF ITS LONG-TERM TRENDS

А.В. Mordvinov

Выполнен сравнительный анализ измерений полного потока излучения Солнца в шкалах ACRIM и PMOD. Анализ интегрированных разностей одновременных измерений потока излучения позволил оценить систематические различия, которые со временем приводят к накоплению больших ошибок. Измерения потока излучения в шкалах ACRIM и PMOD приведены к промежуточной радиометрической шкале путем коррекции данных за систематические ошибки. Скорректированные измерения в единой шкале согласуются и представляют компромисс между исходными наборами данных. Измерения в промежуточной шкале показывают изменения потока излучения между минимумами солнечной активности в 1986, 1996, 2008 гг. Амплитуда этих изменений сравнима с неопределенностью их долговременных трендов, что ставит под сомнение оценки вековых вариаций светимости Солнца, полученные ранее.

A comparison analysis of measurements of total solar flux in ACRIM and PMOD scales was made. The analysis of integrated differences of solar flux simultaneous measurements allowed us to estimate systematic distinctions which can result in accumulation of significant errors. The solar flux measurements in ACRIM and PMOD scales are reduced to the intermediate radiometric scale by data correction for systematic errors. Corrected measurements in the unified scale are consistent and represent a compromise between original data sets. Measurements in the intermediate scale demonstrate changes in solar flux between solar activity maxima in 1986, 1996 and 2008. The amplitude of these measurements is comparable to uncertainty in their long-term trends that calls into question estimations of secular variations of solar luminosity which were obtained before.

Введение

Солнечные пятна, факелы, магнитная сетка – основные физические факторы, которые определяют изменения полного потока излучения Солнца [Willson, et al., 1981; Foukal, Lean, 1988]. Амплитуда кратковременных изменений потока излучения достигает $4 \text{ Вт}/\text{м}^2$, что составляет $\sim 0.3\%$ от его среднего значения. Кроме этих хорошо известных факторов, обнаружены также изменения потока излучения Солнца, связанные с долгоживущими магнитными структурами: комплексами активности, большими факельными площадками и активными долготами [Mordvinov, Willson, 2003]. Эти поверхностные проявления магнетизма Солнца приводят к изменениям его потока излучения в 11-летнем цикле активности [Willson, Hudson, 1991]. Согласно предположению, что поверхностные магнитные поля являются единственной причиной изменения потока излучения, построены эмпирические модели, которые удовлетворительно описывают его изменения в цикле активности [Wenzler, et al., 2006]. Есть теоретические и эмпирические основания полагать, что существуют также изменения светимости Солнца на вековой и тысячелетней шкале времени [Solanki, Fligge, 1999; Mordvinov, et al., 2004; Wang, et al., 2005; Foukal, et al., 2006]. Прямые измерения малых по амплитуде вариаций потока излучения Солнца в абсолютной шкале представляют трудную экспериментальную задачу.

Радиометры серии ACRIM, оснащенные дополнительными каналами для калибровки, обеспечили продолжительные измерения потока излучения, которые послужили основой для построения системы измерений в шкале ACRIM [Willson, 1997; Willson, Mordvinov, 2003]. Радиометр ACRIM-3, выполняющий измерения с 2000 г., характеризуется погреш-

ностью 0.002% и обеспечивает стабильность шкалы измерений с погрешностью около 0.003% в год. Большая часть измерений потока излучения Солнца была получена с помощью радиометров серии ACRIM, которые использовались также при построении шкал PMOD и SARR.

Для построения системы радиометрических измерений в шкале PMOD [Fröhlich, Lean, 1998] использовались также характеризующиеся примерно такими же погрешностями данные радиометра PMO6V, выполняющего измерения на космической обсерватории SOHO. При приведении ранее выполненных радиометрических измерений к шкале PMOD данные Nimbus-7, ACRIM-1 и ACRIM-2 были дополнительно скорректированы для учета изменений чувствительности радиометров со временем. Коррекция прямых измерений была выполнена с применением модельных расчетов, учитывающих влияние пятен и факелов на вариации полного потока излучения Солнца [Fröhlich, Lean, 1998]. Радиометрические измерения с привлечением данных радиометра SOHO/DIARAD были использованы при построении абсолютной шкалы SARR [Dewitte, et al., 2004; Mekaoui, Dewitte, 2008].

Сравнительный анализ измерений потока излучения в шкалах ACRIM и PMOD

С развитием техники внеатмосферных измерений потока излучения Солнца значительно уменьшились погрешности измерений, увеличилась стабильность шкалы радиометрических измерений. Тем не менее, существующие измерения потока излучения, приведенные к абсолютной шкале разными способами, неудовлетворительно согласуются между собой. На рис. 1 точками показан ряд измерений потока излучения S_{ACRIM} в шкале ACRIM, серыми то-

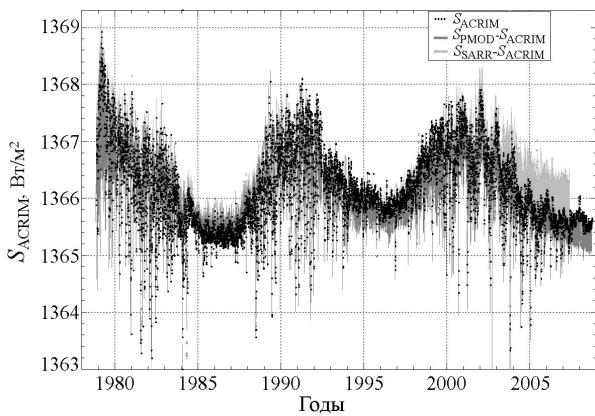


Рис. 1. Измерения полного потока излучения S в шкале ACRIM и различия между ACRIM-PMOD и ACRIM-SARR, отмеченные темными и светлыми тонами.

нами указаны различия между измерениями в трех существующих шкалах $S_{\text{PMOD}} - S_{\text{ACRIM}}$, $S_{\text{SARR}} - S_{\text{ACRIM}}$. Более того, различия в измерениях потока излучения, выполненных радиометрами SOHO/PMOD6V, SOHO/DIARAD, ACRIM-3, накапливаются со временем, что наглядно проявляется в эпохи минимумов активности Солнца. В эпоху продолжительного минимума активности в 2007–2009 гг. различия в измерениях потока излучения Солнца по разным данным превышают 1 Bt/m^2 , что сопоставимо с амплитудой изменений потока в 11-летнем цикле. Вряд ли можно считать нормальным такое положение, когда при уменьшении погрешностей измерений потока излучения данные измерений, приведенные к абсолютной шкале разными способами, все больше расходятся между собой. Такая несогласованность ранее выполненных радиометрических измерений затрудняет их стыковку с измерениями, выполняемыми с 2003 г. радиометром TIM [Kopp, et al., 2005].

При анализе изменений потока излучения Солнца от цикла к циклу были получены противоречивые оценки. Сравнение значений потока излучения в эпохи минимумов активности в 1986, 1996 гг. показало, что полный поток излучения Солнца увеличился за этот период на 0.037% [Willson, Mordvinov, 2003]. Увеличение потока излучения между минимумами активности в 1986 и 1996 гг. на 0.15 Bt/m^2 обнаружено по данным измерений в шкале SARR [Dewitte, et al., 2004; Mekaoui, Dewitte, 2008]. Тем не менее, такое увеличение было оценено как статистически незначимое, поскольку погрешность долговременных измерений составила, по оценкам авторов, еще большую величину $\pm 0.35 \text{ Bt/m}^2$. Небольшое возрастание фонового потока излучения произошло также от 1996 г. к 2008 г. [Willson, 2008; Mekaoui, Dewitte, 2008]. Анализ изменений потока излучения в шкале PMOD не обнаружил заметных изменений между минимумами активности в 1986 и 1996 гг.; между минимумами в 1996 и 2008 гг. оценки показали уменьшение среднего уровня потока излучения [Fröhlich, 2006, 2009; Абдусаматов, 2007].

На рис. 2 *a, б* показана разность между измерениями потока излучения в шкалах ACRIM и PMOD $d = S_{\text{PMOD}} - S_{\text{ACRIM}}$ и ее кумулятивная сумма $\sum d$ как функции времени. Кумулятивная сумма разностей

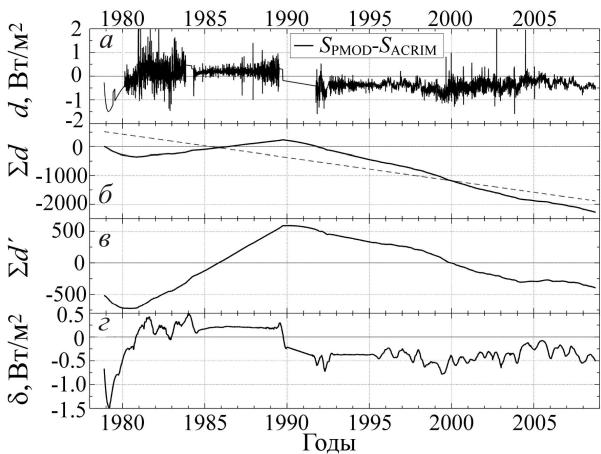


Рис. 2. Разность d между измерениями в шкалах ACRIM и PMOD (*а*); накопленная разность и ее линейная составляющая (*б*); накопленная разность с вычтеною линейной составляющей (*в*); смещение δ между шкалами (*г*).

измерений между шкалами, сглаживая случайные ошибки измерений, характеризует систематические погрешности измерений в интегрированном виде. Линейный тренд в изменении накопленных разностей возникает благодаря постоянному сдвигу между шкалами. На рис. 2, *б* линейная составляющая в изменениях накопленной разности показана штриховой линией. Вклад линейной составляющей в уменьшение накопленной разности составил 2402.10 Bt/m^2 за весь период измерений. Разделив эту величину на число измерений, можно оценить средний сдвиг между шкалами PMOD и ACRIM, который составил $\langle \delta \rangle = 0.2440 \pm 0.0045 \text{ Bt/m}^2$.

Накопленная разность с устраниной линейной составляющей показана на рис. 2, *в*, она характеризует изменения систематических различий между шкалами в интегральном представлении. Например, накопленная разность $\sum d'$ показывает рост в период 1980–1989 гг., который сменился ее уменьшением в 1990–2004 гг., уменьшение $\sum d'$ наблюдается также в 2006–2009 гг. Разрыв в данных между ACRIM-1 и ACRIM-2 в 1989–1990 гг. проявляется в резком изменении поведения накопленной разности. При построении объединенных рядов ACRIM, PMOD и SARR этот разрыв в данных заполнялся измерениями радиометров Nimbus-7 или ERBS с учетом или без дополнительной коррекции за изменения их чувствительности со временем. Все эти различия, а также изменения, связанные с неоднородностью самих данных, проявляются в поведении накопленных разностей. Заметное расхождение в поведении накопленных разностей имело место в начальный период измерений в 1978–1980 гг. из-за поправок, которые были внесены в данные радиометра Nimbus-7 [Fröhlich, Lean, 1998; Fröhlich, 2006]. Накопление систематических ошибок между разными шкалами измерений привело к существенным различиям в долговременном поведении потока излучения Солнца. Особенно наглядно эти различия проявляются в эпохи минимумов активности в 1986, 1996, 2008 гг.

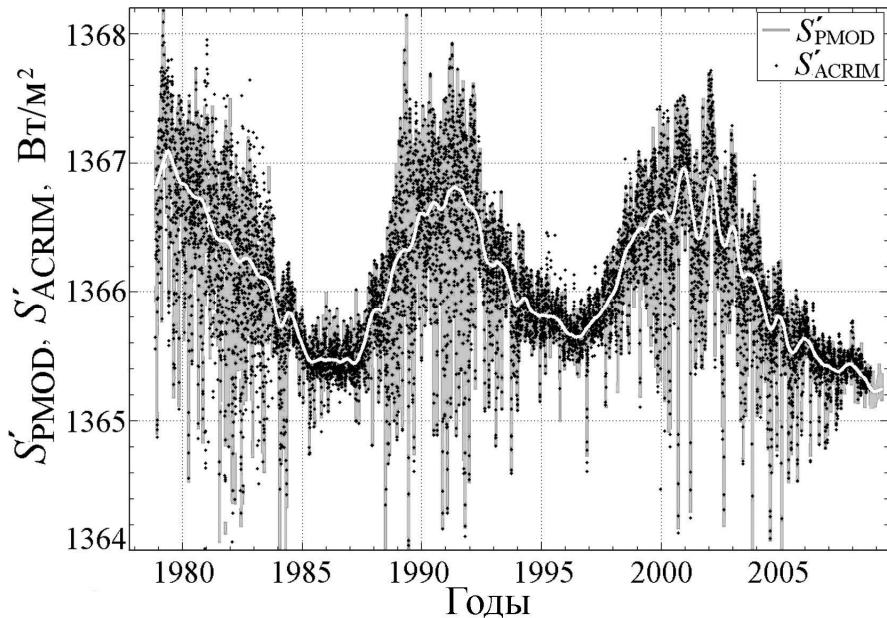


Рис. 3. Измерения потока излучения Солнца в промежуточной радиометрической шкале.

Чтобы определить различия между шкалами измерений PMOD и ACRIM, которые определяются систематическими ошибками, были найдены конечные разности сглаженной кумулятивной суммы $\sum d'$, поскольку именно низкочастотная компонента накопленных разностей определяет относительные систематические ошибки [Мордвинов, 2008]. График $\sum d'$ на рис. 2, в практически совпадает с графиком сглаженной кумулятивной суммы. Конечные разности сглаженной кумулятивной суммы характеризуют лишь систематические различия между шкалами PMOD и ACRIM $\delta = S'_\text{PMOD} - S'_\text{ACRIM}$. В начальный период измерений, когда случайные ошибки и неопределенности калибровки радиометров были особенно велики, абсолютная величина сдвига превышала 1.5 Вт/м². В отдельные периоды времени в изменениях смещения прослеживаются регулярные вариации инструментального происхождения на масштабе времени около года. В течение 23-го цикла смещение между шкалами PMOD и ACRIM оставалось значительным и колебалось около -0.5 Вт/м².

Зная систематические различия между шкалами PMOD и ACRIM, можно преобразовать измерения потока излучения Солнца из одной шкалы в другую: $S'_\text{ACRIM} \approx S'_\text{PMOD} - \delta$. Можно также оценить изменения потока излучения в промежуточной радиометрической шкале, разделив поровну систематическое расхождение между шкалами и скорректировав исходные измерения за систематические ошибки. В промежуточной шкале скорректированные измерения оцениваются по формулам $S'_\text{ACRIM} = S'_\text{ACRIM} + \delta/2$ и $S'_\text{PMOD} = S'_\text{PMOD} - \delta/2$. В отличие от простого усреднения рядов измерений ACRIM и PMOD, такой способ коррекции учитывает только систематические различия между шкалами. Большие случайные погрешности, связанные с кратковременными изменениями потока излучения, не влияют на оценки относительно малых систематических расхождений между шкалами. На рис. 3 показаны скорректированные измерения в промежуточной радиометрической

шкале, различия между которыми определяются только случайными погрешностями. Обе системы измерений хорошо согласуются между собой. Сглаженный ход скорректированных измерений (белая кривая) показывает увеличение потока излучения на 0.191 Вт/м² между минимумами активности 1986–1996 гг. Такая оценка близка к изменениям потока излучения за этот же период, обнаруженным согласно шкале SARR [Dewitte, et al., 2004]. Значительное уменьшение потока излучения на 0.417 Вт/м² в промежуточной шкале наблюдается между минимумами 1996–2008 гг. Это уменьшение больше, чем величина неопределенности долговременных изменений потока излучения, но сопоставима с текущим сдвигом δ между шкалами ACRIM и PMOD в 2008 г.

Выходы

Анализ накопленных разностей между систематическими радиометрическими измерений позволил оценить систематические различия между ними, а также количественно охарактеризовать степень неопределенности в оценке возможных долговременных трендов полного потока излучения Солнца. Несмотря на улучшение точности и стабильности внеатмосферных измерений потока излучения Солнца, достигнутое за период 1978–2009 гг., между существующими радиометрическими шкалами остаются значительные систематические различия. Накопление систематических ошибок между параллельными измерениями в разных шкалах приводят к большим расхождениям, которые наглядно проявляются в эпохи минимумов солнечной активности. Оценена величина систематического расхождения между шкалами ACRIM и PMOD, ее изменения со временем. Оценены изменения полного потока излучения Солнца в промежуточной радиометрической шкале, которая построена по данным, скорректированным за относительные систематические погрешности. Данные измерений в шкалах ACRIM и PMOD, приведенные к промежуточной шкале, хорошо согласуются и представляют собой возможный компромисс.

Систематические расхождения между радиометрическими шкалами характеризуют величину неопределенности в оценке возможных долговременных трендов полного потока излучения Солнца. Средняя величина модуля разностей между измерениями в шкалах ACRIM и PMOD составляет $\langle \delta \rangle = 0.35 \text{ Вт/м}^2$, что согласуется с независимой оценкой, сделанной в шкале SARR. Такая неопределенность сопоставима с наблюдаемыми изменениями потока излучения между минимумами активности в 1986, 1996, 2008 гг. Если эти изменения существуют реально, то возможно, что они определяются продолжительностью эпох минимумов, во время которых происходит полная или частичная релаксация тепловых возмущений, связанных с поверхностными и подфотосферными магнитными полями [Кичатинов и др., 2002].

Работа выполнена по программе Президиума РАН №4, ГК 02.740.11.0576 при поддержке ведущих научных школ НШ-3552.2010.2 и РФФИ 09-02-90204-монг-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абдусаматов Х.И. Об уменьшении потока солнечного излучения и понижении глобальной температуры Земли до состояния глубокого похолодания в середине XXI века // Изв. КрАО. 2007. Т. 103. С. 292–298.

Кичатинов Л.Л., Мордвинов А.В., Пипин В.В. Вариации светимости Солнца в 11-летнем цикле: наблюдения, физика, модели // Солнечно-земная физика. 2002. Вып. 2. С. 3–6.

Мордвинов А.В. Долговременные изменения интегрального потока излучения Солнца и погрешности их оценок // Труды конф. «Солнечная и солнечно-земная физика–2008». ГАО РАН, Санкт-Петербург. 2008. С. 247–250.

Dewitte S., Crommelynck D., Mekaoui S., Joukoff A. Measurement and uncertainty of long term total solar irradiance trend // Solar Phys. 2004. V. 224. P. 209–216.

Foukal P., Lean J.L. Magnetic modulation of solar luminosity by photospheric activity // Astrophys. J. 1988. V. 328. P. 347–357.

Foukal P., Fröhlich C., Spruit H., Wigley T.M.L. Variations in solar luminosity and their effect on the Earth's climate // Nature. 2006. V. 443. P. 161–166.

Fröhlich C. Solar irradiance variability since 1978 // Space Sci. Rev. 2006. V. 125. N 1–4. P. 53–65.

Fröhlich C. Evidence of a long-term trend in total solar irradiance // Astron. Astrophys. 2009. V. 501. P. L27–L30.

Fröhlich C., Lean J. The Sun's total irradiance: cycles and trends in the past two decades and associated climate change uncertainties // Geophys. Res. Lett. 1998. V. 25. P. 4377–4380.

Kopp G., Lawrence G., Rottman G. The Total Irradiance Monitor (TIM): Science Results // Solar Phys. 2005. V. 230. P. 129–139.

Mordvinov A.V., Makarenko N.G., Ogurtsov M.G., Jungner H. Reconstruction of magnetic activity of the Sun and changes in its irradiance on a millennium timescale using neurocomputing // Solar Phys. 2004. V. 224. P. 247–253.

Mekaoui S., Dewitte S. Total solar irradiance measurement and modelling during cycle 23 // Solar Phys. 2008. V. 247. P. 203–216.

Mordvinov A.V., Willson R.C. Effect of large-scale magnetic fields on total solar irradiance // Solar Phys. 2003. V. 215. P. 5–16.

Solanki S.K., Fligge M. A reconstruction of total solar irradiance since 1700 // Geophys. Res. Lett. 1999. V. 26. P. 2465–2468.

Willson R.C., Gulkis S., Janssen M., et al. Observations of solar irradiance variability // Science. 1981. V. 211. P. 700–702.

Willson R.C., Hudson H.S. The Sun's luminosity over a complete solar cycle // Nature. 1991. V. 351. P. 42–44.

Wenzler T., Solanki S.K., Krivova N.A., Fröhlich C. Reconstruction of solar irradiance variations in cycles 21–23 based on surface magnetic fields // Astron. Astrophys. 2006. V. 460. P. 583–595.

Wang Y.-M., Lean J.L., Sheeley N.R. Modeling the Sun's Magnetic Field and Irradiance Since 1713 // Astrophys. J. 2005. V. 625. P. 522–538.

Willson R.C. Total solar irradiance trend during solar cycle 21 and 22 // Science. 1997. V. 277. P. 1963–1965.

Willson R.C., Mordvinov A.V. Secular total solar irradiance trend during solar cycles 21–23 // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30. P. 1199–1202.

Willson R.C. <http://www.acrim.com>. 2008.

Институт солнечно-земной физики, Иркутск