

КОСМИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ РАЗМЕРА И ФОРМЫ ВИДИМОГО ДИСКА СОЛНЦА

Бабенко Ю. Г., Вертиполох А. Я., Гнатык Б. И., Данилевский В. А.

Астрономическая обсерватория Киевского национального университета имени Тараса Шевченко

Приводится краткий обзор результатов современных измерений фотосферного диаметра Солнца и его сжатия. Обосновывается необходимость повышения точности измерений этих параметров Солнца, предлагается концепция и структурная схема прибора для измерений углового диаметра и сжатия видимого диска Солнца из-за пределов земной атмосферы.

В современную эпоху данные о диаметре и форме поверхности Солнца (т.е. о сжатии вдоль полярной оси) используются при решении таких задач, как 1) калибровка эволюционных моделей внутреннего строения Солнца; 2) поиски возможных изменений размеров Солнца на разных отрезках времени, от 11/22-летнего цикла до периодов порядка 10^6 лет, и связанных с этим вариаций светимости Солнца и возможного их влияния на эволюцию земного климата; 3) определения квадрупольного момента Солнца, влияющего на эволюцию планетных орбит [1].

В последнее время в гелиофизике используются два определения диаметра Солнца. 1) Фотосферный диаметр — это диаметр солнечной фотосферы, которая создает контур видимого диска Солнца. Он определяется как диаметр слоя, где температура среды равна эффективной температуре Солнца T_{ef} , связанной с его светимостью L_S и радиусом R_S указанного слоя формулой: $L_S = 4\pi \cdot R_S^2 \cdot \sigma \cdot T_{ef}^4$. 2) “Сейсмический” диаметр Солнца, т. е. диаметр эквипотенциальной поверхности, циклическая частота фундаментальных мод колебаний которой измеряется средствами гелиосейсмологии и связана с массой Солнца и радиусом указанной поверхности. Определения сейсмического диаметра начались в 1996–1997 гг. по данным измерений указанной частоты прибором SOI/MDI на космической обсерватории SOHO [2], а также в сети наземных гелиосейсмологических станций GONG [3]. Как оказалось, сейсмический радиус меньше усредненного фотосферного приблизительно на 0.04 %, что составляет приблизительно 275 км при оценке погрешности для сейсмического радиуса около 30 км. Это расхождение пока еще не имеет объяснения и, возможно, отображает различие физической сущности этих величин, поскольку фотосфера — это видимая поверхность Солнца глубиной в 100–150 км, тогда как сейсмический диаметр определяется физическим состоянием солнечной плазмы на глубине в несколько тыс. км. С другой стороны, это может свидетельствовать также и о недостаточной точности измерений радиуса солнечной фотосферы. Современные наземные измерения угловых размеров видимого солнечного диска выполняются многими методами при фотоэлектрической или визуальной регистрации положения ее лимба в поле зрения телескопа в оптическом и ближнем инфракрасном диапазоне длин волн излучения, так как в этом диапазоне на-

блюдается четкий край солнечного диска. Также угловой фотосферный диаметр Солнца определяется по данным наблюдений полных затмений Солнца и прохождений Меркурия по его диску [1, 5]. При этом имеет место разброс значений радиуса Солнца в пределах 1000–1500 км (что для стандартного расстояния 1 а. е. составляет приблизительно 1.5–2") как полученных разными методами на одну и ту же эпоху, так и между полученными одним и тем же методом на разные эпохи, равно как и между результатами его определений в разных местах разными методами. Указанные различия намного превосходят декларируемые (приблизительно на уровне 0.05 - 0.1" или же приблизительно 35–70 км) погрешности усредненных результатов измерений [1, 6]. Но по светимости и радиусу фотосферы калибруются современные модели внутреннего строения Солнца. При этом "подгонка" указанных параметров к соответствующим значениям, полученным из астрономических наблюдений, выполняется с относительной точностью порядка 10^{-4} – 10^{-6} [4]. Для углового радиуса солнечного диска на расстоянии 1 а. е. это составляет ошибку порядка 0.001-0.01", что намного меньше указанного выше разброса результатов его современных измерений. Если указанные выше различия между фотосферным и сейсмическим радиусами Солнца окажутся реальными, то это приведет к изменению глубины конвективной зоны, профиля плотности солнечной плазмы и других параметров, т. е. уточнение фотосферного радиуса Солнца из измерений привело бы к уточнению моделей его внутреннего строения.

С другой стороны, возможные вариации светимости Солнца, хотя бы в пределах ошибок ее измерений (порядка 0.1 %), могут существенно влиять на климат Земли. В частности, по оценкам климатологов, изменение солнечной постоянной на 1 % может привести к изменениям равновесной температуры Земли как планеты приблизительно на 0.65 К, а изменение температуры поверхности может быть в несколько раз большим [10]. А поскольку из приведенной выше формулы, связывающей светимость, радиус и эффективную температуру, при пренебрежении возможными изменениями эффективной температуры вытекает, что вариации радиуса Солнца должны примерно вдвое превышать вариации светимости, так как $\frac{\Delta L}{L} \approx 2 \cdot \frac{\Delta R}{R}$, то этим также обосновываются попытки выявить их для оценок изменчивости светимости Солнца [1].

Одна из главных причин указанного выше разброса результатов наземных измерений фотосферного диаметра Солнца — влияние земной атмосферы на положение края изображения солнечного диска в фокальной плоскости телескопа. Вклад земной атмосферы в суммарную ошибку одного измерения фотосферного диаметра Солнца для разных мест наблюдений изменяется со временем, и по оценкам разных авторов может составлять приблизительно от 0.1 до 1" [7, 8]. Меньше влияет атмосфера на результаты определения фотосферного диаметра из наблюдений полных затмений Солнца и прохождений Меркурия по его диску. Но кроме того, что эти явления случаются довольно редко, процедуры их наблюдений и обработки данных достаточно сложны, с чем связаны специфические ошибки определения диаметра Солнца этими методами [1, 5, 9].

Вопрос о вековых трендах и вариациях размеров Солнца из наблюдений как в нашу эпоху, так и в прошлом, остро дискутируется, выводы противоречивы и зависят от метода измерений, что и не удивительно при указанных выше ошибках. Анализ некоторыми исследователями рядов данных измерений диаметра солнечной фотосферы с наземными приборами в оптическом диапазоне спектра, а также анализ наблюдений полных затмений Солнца и прохождений Меркурия по его диску показывают наличие в этих рядах вариаций диаметра с периодами приблизительно в 11, 22, 80 лет при амплитудах приблизительно от 0.1 до 0.25", но при существенных сдвигах фаз между разными рядами и рядом показателей солнечной активности [1, 6, 9, 11]. Поэтому обнаружение каких-либо изменений диаметра Солнца по данным наземных измерений пока что подвергается сомнениям [8].

Форма видимого солнечного диска представляет собой проекцию на небесную сферу эквипотенциальной поверхности, определяемой распределением вещества в теле Солнца. В зависимости от внутреннего строения Солнца форма его поверхности может в той или иной степени отклоняться от сферы. Форма поверхности Солнца играет важную роль в астрономии и астрофизике по нескольким причинам [12], и в частности потому, что она влияет на эволюцию планетных орбит. Поскольку ось вращения Солнца наклонена относительно плоскости эклиптики, то величина его квадрупольного момента J_2 , определяемого через сжатие Солнца вдоль полярной оси, может вызывать заметные вековые вариации орбитальных элементов планет [12–14]. Также без надежного определения квадрупольного момента Солнца трудно оценить релятивистский вклад в движение линий апсид планет, в частности Меркурия, поскольку данные астрометрических наблюдений малых планет дают лишь возможность оценить верхний предел для J_2 , и, кроме того, ряды наблюдений планет с достаточно малыми перигелийными расстояниями имеют существенные пробелы. С другой стороны, квадрупольный момент Солнца может служить одним из входных параметров для моделирования его внутреннего строения, поэтому важно определять J_2 с наивысшей достижимой точностью [12–14]. Сжатие солнечного диска определяется как отношение разницы между его экваториальным и полярным радиусами к экваториальному радиусу. Теоретическая оценка этого параметра зависит от принятой модели внутреннего строения Солнца как звезды и распределения скорости вращения по его телу. Современные оценки сжатия Солнца, в зависимости от принятой теории, дают значения от $6.7 \cdot 10^{-6}$ до $1.1 \cdot 10^{-5}$, что соответствует разности экваториального и полярного радиусов приблизительно от 0.0064 до 0.010" с ошибкой ± 0.0001 " [12–14]. По измерениям, выполненным в 1966–1994 гг. с наземными инструментами, и с аэростата в 1992 г. значения этого параметра находятся в диапазоне от $6.2 \cdot 10^{-6}$ до $4.2 \cdot 10^{-5}$ при ошибках от $1 \cdot 10^{-6}$ до $6 \cdot 10^{-6}$ [15, 16], т. е. разброс экспериментальных результатов превышает диапазон неопределенности теорий. Было также высказано предположение о возможности вариаций сжатия Солнца, связанных с солнечной активностью [17].

Для исключения влияния земной атмосферы на результаты определения фотосферного диаметра и сжатия Солнца, необходимо выполнять такие измерения за пределами земной атмосферы. До сих пор были выполнены два запуска специального инструмента — секстанта солнечного диска (SDS — Solar Disk Sextant) на воздушном шаре на высоту 36 км, где он на протяжении 5 часов выполнял измерения диаметра и сжатия солнечного диска [16, 18]. Также сообщалось о подготовке на базе указанного инструмента нового прибора EUDOSSO, предназначенного для измерений диаметра Солнца с борта космического аппарата [19], о дальнейшей судьбе этого проекта в научных изданиях сообщений не было. Кроме того, были сделаны также оценки вариаций фотосферного диаметра Солнца по его изображениям, полученным с упомянутым выше прибором SOHO/MDI на протяжении чуть более двух лет (с 19.04.1996 по 24.06.1998) [20]. Следует подчеркнуть, что в этих методах, как и в современных наземных методах, использующих невизуальную регистрацию солнечного излучения, диаметр фотосферы Солнца определяется как расстояние между точками перегиба функции распределения интенсивности излучения на диаметрально противоположных краях видимого диска вдоль его радиуса (функции потемнения солнечного диска к краю). А как известно из предыдущих исследований, в частности из наблюдений затмений Солнца, функция потемнения солнечного диска на его крае изменяется очень быстро — приблизительно на 3 порядка величины на отрезке радиуса, не превышающем 1". Кроме того, она имеет довольно сложную форму на участке за 1.5–2" до точки своего перегиба, а положение последней может зависеть от наличия факелов на лимбе диска в месте измерений [1]. Поэтому, по нашему мнению, результаты, полученные по ПЗС-изображениям Солнца на SOHO в масштабе приблизительно 1"/пкл, могут быть отягощены значительными погрешностями, ибо наиважнейшие и самые сложные по форме участки функции потемнения на лимбе интерполировались самое большее по трем измеренным точкам [20]. Это же касается и запланированного к запуску в 2005 г. французского космического аппарата «Picard» для одновременных измерений размера и формы видимого диска Солнца и его светимости [14, 21].

Нам представляется, что определение фотосферного диаметра солнечного диска по положениям точек перегиба функции распределения интенсивности на его лимбе будет корректным при пространственном разрешении порядка 0.1" или лучше. Указанная функция распределения интенсивности может быть построена по измерениям при помощи ПЗС-матриц, распределения яркости в изображении солнечного диска в фокальной плоскости телескопа. Мы предлагаем космический эксперимент по определению абсолютного фотосферного диаметра видимого солнечного диска и его сжатия путем измерений распределения интенсивности излучения на противоположных краях крупномасштабного (10–15"/мм) изображения вдоль радиуса диска с последующим определением углового расстояния между точками перегиба. Изображение строится при помощи телескопа системы Кассегрена с эквивалентным фокусным расстоянием 15–20 м, а распределение интенсивности измеряется при помощи ПЗС-матриц в нескольких

диаметрально противоположных участках лимба этого изображения. Определяя при помощи специального устройства — интерферометра фокальное расстояние телескопа, и поддерживая с необходимой точностью расстояние между ПЗС–детекторами в фокальной плоскости, а также измерив заранее инструментальный контур (аппаратную функцию) телескопа в пределах всего поля зрения, можно определять угловой диаметр Солнца, а также его сжатие с ошибкой порядка 0.001". Процедура измерений заключается в одновременном получении сигналов от всех ПЗС–детекторов одновременно и передаче их в устройство накопления данных на протяжении заданного промежутка времени (порядка 1 с) при частоте снятия данных порядка 10 Гц. Если длительность одного сеанса измерений будет 20–30 мин., то это позволит выявлять 5-минутные колебания солнечной поверхности.

Структурная схема предлагаемого прибора для измерения диаметра и формы солнечного диска приведена на рис. 1. Конструктивно прибор состоит из блока, расположенного вне герметичного отсека модуля космической станции, и из блока, расположенного в модуле станции. Внешний блок состоит из телескопа и системы наведения, блока фотодетекторов и системы контроля параметров телескопа. Внутренний блок (блок электроники) состоит из блоков накопления данных измерений, обработки и передачи информации, блоков управления и питания.

Измерения диаметра солнечной фотосферы в нашем эксперименте предполагается выполнять примерно в тех же участках оптического спектра солнечного излучения, в которых были получены длительные ряды наиболее точных наземных измерений: 0.47, 0.55, 0.63 и 0.80 мкм при ширине полос примерно от 0.01 мкм до 0.1 мкм.

Проведение систематических высокоточных измерений размеров и формы поверхности Солнца, по нашему мнению, позволит получить результаты, важные для изучения как строения и эволюции Солнца и Солнечной системы, так и механизмов солнечно-земных связей.

1. *Вариации глобальных характеристик Солнца*/Под ред. Э. А. Гуртовенко. Киев, 1992, 304 с.
2. Schou J., Kosovichev A. G., Goode P. R., Dziembowski W. A. Determination of the Sun's seismic radius from the SOHO Michelson Doppler Imager//*Astroph. J.*, vol. 489, 1997, pp. L197–L200.
3. Antia H. M. Estimate of solar radius from f-mode frequencies//*Astron. and Astroph.* vol. 330, 1998, pp. 336–340.
4. Guenther D. B., Demarque P., Kim Y.-C., Pinsonneault M. H. Standard solar model//*Astroph. J.*, vol. 387, 1992, pp. 372–393.
5. Danylevsky V. O. The solar diameter determination from data of the 1991 July 11 solar eclipse photoelectric observation / Proceedings of the 1999 solar eclipse workshop//*Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso*, vol. 28, 1999. №3, pp. 201–209.
6. Laclare F., Delmas C., Coin J.R., Irbah A. Measurements and variations of the solar diameter//*Solar Physics*, vol. 166, 1996, pp. 211–229.
7. Irbah A., Laclare F., Borgnino J., Merlin G. Solar diameter measurement with Salern Observatory astrolabe and atmospheric turbulence effect//*Solar Physics*, vol.149, 1994, pp. 213–230.
8. Toulmonde M. The diameter of the Sun over the past three centuries//*Astron. and Astrophys.* vol. 325, 1997, pp. 1174–1178.
9. Свешников М. Л.. Вариации радиуса Солнца из прохождений Меркурия по его диску//*Письма в АЖ*, т. 28, 2002, №2, с. 133–139.
10. Поток энергии Солнца и его изменения / ред. О. Уайт. — М.: Мир, 1980, 560 с.

11. Ulrich R. K., Bartello L. Solar-cycle dependence of the Sun's apparent radius in the neutral iron spectral line at 525 nm//*Nature*, vol. 377, 1995, No. 6546, pp. 214–215.
12. Rozelot J. P., Godier S., Lefebvre S. On the theory of the oblateness of the Sun//*Solar Physics*, vol. 198, 2001, pp. 223–240.
13. Dicke R. H. The solar oblateness and the gravitational quadrupole moment//*Astrophys. J.*, vol.159, 1970, pp. 1–24.
14. Godier S., Rozelot J. P. A new outlook on the “differential theory” of the solar quadrupole moment and oblateness//*Solar Physics*, vol. 199, 2001, pp.217–229.
15. Rösch J., Rozelot J. P., Deslandes H. A new estimate of the quadrupole moment of the Sun//*Solar Physics*, vol. 165, 1996, pp. 1–11.
16. Sofia S., Heaps W., Twigg L.W. The solar diameter and oblateness measured by the solar disk sextant on the 1992 september 30 balloon flight//*Astrophys. J.*, vol. 427, 1994, pp.1048–1052.
17. Dicke R. H., Khun J. R., Libbrecht K. G. The variable oblateness of the Sun: Measurement of 1984//*Astrophys. J.*, vol. 311, 1986, pp. 1025–1030.
18. Maier E., Twigg L., Sofia S. Preliminary results of a balloon flight of the solar disk sextant//*Astrophys. J.*, vol. 389, 1992, pp.447–452.
19. Paterno L., Sofia S. EUDOSSO: a space project for solar oscillations and long term variability relevant to climatic changes//*Solar Physics*, vol. 152, 1994, pp. 303–308.
20. Emilio M., Khun J. R., Bush R. I., Scherrer P. On the Constancy of the solar diameter//*Astrophys. J.*, vol. 543, 2000, pp. 1007–1010.
21. Dame L., Herse M., Thuillier G. et al. Picard: simultaneous measurements of the solar diameter, differential rotation, solar constant and their variations//*Adv. in Space Res.*, vol. 24, 1999, № 2, pp. 205–214.

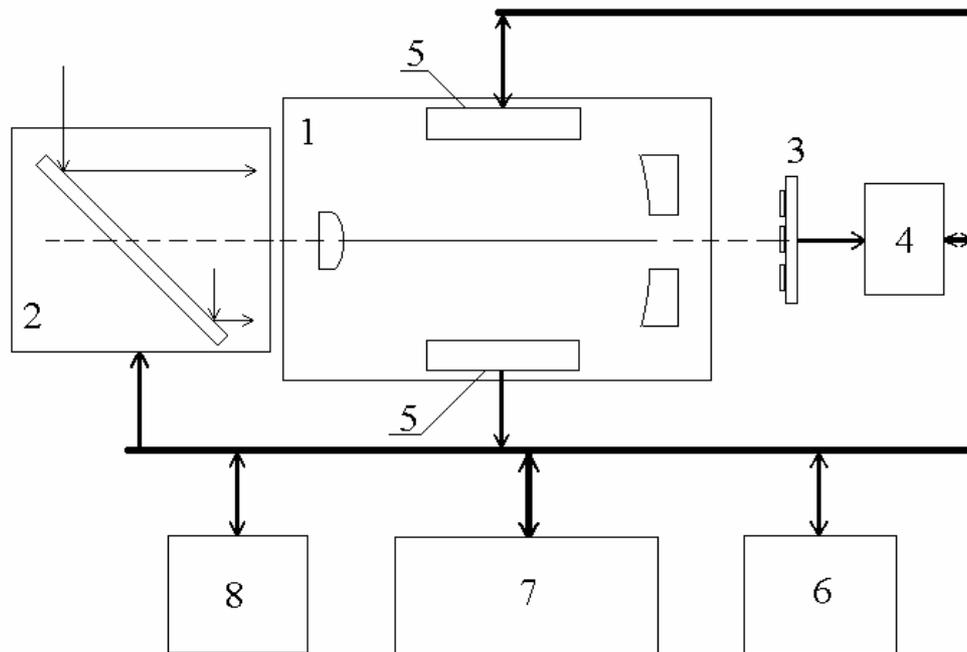


Рис. 1. Структурная схема прибора для измерения диаметра и формы солнечного диска

1 — длиннофокусный телескоп; 2 — система наведения телескопа на Солнце; 3 — блок фотодетекторов; 4 — блок накопления данных измерений; 5 — система контроля параметров телескопа; 6 — блок обработки и передачи информации; 7 — блок управления; 8 — блок питания.