

РАДИОХАРАКТЕРИСТИКИ СПОКОЙНОГО СОЛНЦА В ДИАПАЗОНЕ 2—4 см ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА РАТАН-600

В. Н. Боровик

Приводятся методика и результаты исследования спокойного Солнца на пяти волнах в диапазоне 2—4 см с разрешением $17'' \times 13' - 33'' \times 25'$ по наблюдениям на РАТАНе-600. Установлено, что яркость распределена по диску равномерно до $0.95 R_{\odot}$. Уярчение на лимбе на волне 4.0 см составляет около 10%, с укорочением волны оно уменьшается и практически отсутствует на волне 2.0 см. Определен спектр яркостных температур в центре диска. Яркостная температура падает наполовину на расстоянии $1.024 R_{\odot}$ (2.0 см), $1.029 R_{\odot}$ (2.3 см), $1.032 R_{\odot}$ (2.7 см), $1.035 R_{\odot}$ (3.2 см), $1.052 R_{\odot}$ (4.0 см) и составляет соответственно 400, 550, 700, 1100 и 1500 К на расстоянии $1.1 R_{\odot}$ от центра диска. Полученные характеристики свидетельствуют о существенно неоднородной структуре переходного слоя и внутренней короны.

The method and results of the quiet Sun investigations at five wavelengths in the range of 2.0—4.0 cm with the resolution of $17'' \times 13' - 33'' \times 25'$ from solar radio observations on RATAN-600 are discussed. It is shown that the brightening is distributed evenly over the disk till $r=0.95 R_{\odot}$. There is the limb brightness about 10% at 4.0 cm which decreases at shorter wavelengths and practically is absent at 2.0 cm. The spectrum of brightness temperature in the centre of the disk is determined. The brightening temperature half decreases at the distance of $1.024 R_{\odot}$ (2.0 cm), $1.029 R_{\odot}$ (2.3 cm), $1.032 R_{\odot}$ (2.7 cm), $1.035 R_{\odot}$ (3.2 cm), $1.052 R_{\odot}$ (4.0 cm), and is equal 400, 550, 700, 1100, 1500 K respectively at the distance of $1.1 R_{\odot}$ from the centre of the disk. It is possible to explain the obtained characteristics by the inhomogeneous structure of the transition region and inner corona.

Исследование спокойного Солнца в коротковолновой части сантиметрового диапазона радиоволн дает ценную информацию о строении таких областей невозмущенной солнечной атмосферы, как переходный слой и прилегающие к нему верхняя хромосфера и нижняя корона. Одной из важных характеристик является распределение радиояркости по диску спокойного Солнца. Для исследования этой задачи необходимо проводить наблюдения Солнца с высоким пространственным разрешением. Желательно также иметь большой ряд однородных регулярных наблюдений Солнца, с тем чтобы статистически выделить уровень излучения спокойного Солнца.

При эпизодических затменных наблюдениях, так же как и при внезатменных, выполненных с недостаточным пространственным разрешением, существует проблема выделения из общего потока радиоизлучения Солнца компоненты, связанной с невозмущенной атмосферой, и исключения влияния активных областей. Именно этой трудностью объясняется противоречивость результатов, полученных до недавнего времени, по вопросу распределения радиояркости по диску спокойного Солнца: в одних работах утверждалось наличие сильного (до 100%) уярчения на лимбе, в других приводились доказательства существования равномерного распределения яркости по диску. Разброс данных относительно величины радиорadiusa

Солнца составлял от 1.0 до 1.1 R_{\odot} , а выводы о связи его с фазой цикла солнечной активности были противоречивыми [1, 2].

Очевидно, что более точная информация о радиоизлучении спокойного Солнца может быть получена из наблюдений на больших радиотелескопах.

Так, серия наблюдений спокойного Солнца на 100-метровом зеркале в Бонне на волнах 2.85 см (июль 1973 г.), 1.85 см (сентябрь 1973 г.) и 1.25 см (февраль 1974 г.) с разрешением соответственно 80, 50 и 42" показала, что яркость по диску распределена равномерно [3].

Исследование характеристик спокойного Солнца было проведено также в Пулковско, где начиная с 1963—1964 гг. до настоящего времени ведутся регулярные, практически ежедневные наблюдения Солнца на Большом пулковском радиотелескопе (БПР) с высоким разрешением на ряде волн сантиметрового диапазона. В результате исследования более 3500 записей Солнца, полученных на волне 3.2 см с разрешением 1' за период с 1964 по 1977 г., было установлено, что яркость по диску до 0.9 R_{\odot} распределена равномерно с точностью до 10%; уярчение на лимбе не превышает 20%, если его аппроксимировать яркой полосой шириной 1'; эффективный радиорadius Солнца составляет (1.03—1.05) R_{\odot} ; заметная эллиптичность в радиоизображении Солнца отсутствует; основные радиохарактеристики спокойного Солнца не меняются с фазой цикла солнечной активности [4, 5].

Наблюдения на волнах 4.5, 6.6 и 9.0 см, выполненные также на БПР, показали, что с ростом длины волны уярчение на лимбе становится более заметным, достигая 30—40% на волне 9.0 см, растут степень эллиптичности и размеры радиоизображения Солнца [6].

С вступлением в строй радиотелескопа РАТАН-600 появились новые возможности исследования характеристик спокойного Солнца в сантиметровом диапазоне радиоволн благодаря следующим характеристикам радиотелескопа:

1) высокая разрешающая способность РАТАНа: на волне 3.2 см разрешение составляет 14—27" в направлении E—W, что в несколько раз выше, чем у других существующих радиотелескопов с заполненной апертурой, используемых для наблюдений Солнца;

2) широкодиапазонность, т. е. возможность вести наблюдения одновременно на нескольких волнах;

3) реальная возможность получать достаточно регулярные наблюдения Солнца для статистического исследования различных характеристик солнечного радиоизлучения (благодаря тому, что на РАТАНе можно проводить параллельно наблюдения нескольких источников на разных секторах антенны).

Настоящая работа посвящена результатам наблюдения спокойного Солнца на РАТАНе в диапазоне 2—4 см. Частично эти результаты опубликованы в работе [7]. В данной работе в основном уделяется внимание методике исследования характеристик спокойного Солнца по наблюдениям на РАТАН-600.

Методика наблюдений. Наблюдения проводились на южном секторе РАТАНа, работающем в комбинации с плоским перископическим зеркалом [8] на волнах 2.0, 2.3, 2.7, 3.2 и 4.0 см. Для изучения характеристик спокойного Солнца был выбран период наблюдений в ноябре—декабре 1977 г.* Выбор этого периода обусловлен следующими причинами:

1) уровень солнечной активности был низким, большая часть диска была свободна от активных областей;

2) наблюдения Солнца проводились ежедневно на всех пяти волнах;

3) кроме солнечных наблюдений в указанный период на южном секторе РАТАНа проводились регулярные наблюдения Луны и других опорных

* В ноябре наблюдения Солнца на РАТАНе проводила В. Н. Боровик, а в декабре В. Н. Ихсанова.

источников, необходимых для исследования диаграммы антенны и решения ряда методических вопросов, связанных с обработкой записей Солнца.

Размеры диаграммы направленности южного сектора РАТАНа с перископом по уровню половины мощности были следующие:

λ , см	2.0	2.3	2.7	3.2	4.0
θ (E—W)	15"	17"	20"	25"	31"
θ (N—S)	13'	15'	17'	22'	26'

Приведенные размеры горизонтальной диаграммы — результат интерполяции измеренных параметров диаграммы на основе наблюдений дискретных источников (использованы также наблюдения опорных объектов на волнах 2.08, 3.9, 8.2 и 13 см, выполненные Трушкиным, Мингалиевым и Юсуповой). Измерения вертикальной диаграммы проводились автором совместно с сотрудниками ГАИШа (Ларионовым, Сидоренковым и др.) в феврале 1978 г. на волне 3.4 см по наблюдениям квазара 3С 273, а также Ахмедовым по наблюдениям Крабовидной туманности на волнах 2.0, 2.3, 2.7, 3.2 и 4.0 см в октябре 1977 г.

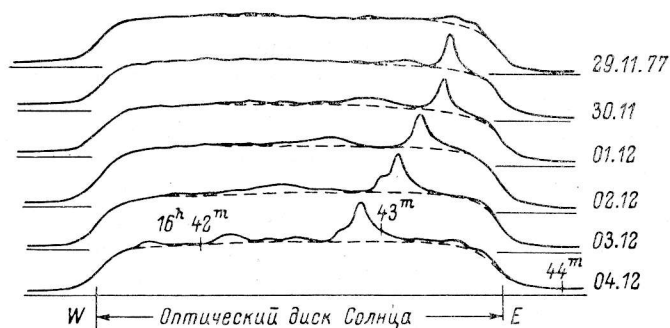


Рис. 1. Примеры записей Солнца на южном секторе РАТАНа с перископом на волне 3.2 см.

В наблюдениях Солнца использовался спектрально-поляризационный комплекс, разработанный в САО АН СССР [9]. Чувствительность радиоприемной аппаратуры была такова, что при использовавшейся постоянной времени, взятой в пределах 0.2—0.6 с, ширина шумовой дорожки (в среднем одинаковая на всех волнах) составляла 0.8—1.2 К. Антенная температура на крайних волнах рассматриваемого диапазона (2 и 4 см) составляла соответственно 5000 и 6500 К. Наблюдения Солнца проводились раз в сутки при прохождении Солнца через меридиан.

Обработка записей Солнца. Выделение контура спокойного Солнца. При обработке записей Солнца ставилась задача выделить среднестатистический контур спокойного Солнца, соответствующий минимальному уровню излучения при отсутствии активных областей на диске, который в принципе определялся как нижняя огибающая на ряде совмещенных друг с другом записей, приведенных к одному масштабу [10]. На практике для отдельных периодов наблюдений (8—15 дней), когда активность Солнца была достаточно низкой, контур спокойного Солнца проводился на каждой записи по участкам, соответствующим невозмущенным областям на диске. Среднестатистический контур находился по максимуму распределения ординат контуров, выделенных на отдельных записях. Разброс параметров при этом составлял 1—2% от среднего значения.

На рис. 1 показаны примеры записей Солнца на РАТАНе на волне 3.2 см за шесть последующих дней. Контур спокойного Солнца проведен штриховой линией. При выбранном масштабе на записях Солнца не видно радио-

грануляции — тонкой структуры в распределении яркости по диску спокойного Солнца, связанной с хромосферной сеткой, которую можно видеть на записях Солнца на РАТАНе при применении специальной методики выделения слабых флуктуаций радиояркости на фоне среднего уровня излучения спокойного Солнца [11]. Что касается волокон, с которыми по существующим представлениям связаны области пониженного радиоизлучения в коротковолновой части сантиметрового диапазона радиоволн [12], в настоящем исследовании их учитывать не пришлось, так как за рассматриваемый период на записях Солнца не видно областей пониженной яркости, связанных с волокнами. В большинстве случаев это объясняется тем, что при наблюдениях с ножевой диаграммой волокна часто попадают в диаграмму одновременно с какими-либо активными областями, и повышенное излучение последних маскирует эффект понижения яркости над волокнами.

Таким образом, выделенный нами контур спокойного Солнца соответствует некоторому среднему уровню излучения невозмущенного Солнца, на котором нет активных образований (пятен и флоккул). Отметим, что среднестатистический контур спокойного Солнца, выделенный на записях периода ноябрь—декабрь 1977 г., совпал с контурами спокойного Солнца, аналогично выделенными на записях, полученных на южном секторе РАТАНа в другие периоды наблюдений.

Исключение рассеянного фона диаграммы на записях Солнца. В процессе обработки записей Солнца, полученных на РАТАНе (так же как и на БПР), встает проблема выделения записи Солнца в главном лепестке диаграммы и исключения подложки, связанной с рассеянным полем диаграммы. В то время как расчетом можно учесть, например, абберационные эффекты диаграммы, связанные с выносом облучателя из фокуса, рассеянный фон диаграммы, обусловленный ошибками отражающей поверхности антенны, полностью учесть расчетным путем трудно, так как кроме систематических ошибок поверхности антенны есть еще случайные ошибки, связанные с установкой отдельных элементов поверхности антенны (щитов) и вторичного отражающего зеркала.

В настоящей работе для исключения подложки на записях Солнца использовались записи Луны, полученные также на южном секторе РАТАНа с перископом. При этом существенно, что Луна не имеет собственной излучающей атмосферы, а размеры ее оптического диска близки к размерам солнечного диска, и потому структура подложки на записях Солнца и Луны, полученных с одинаковой диаграммой, должна быть также одинаковой.

Было обработано более 100 записей Луны, полученных за период октябрь 1977 г.—январь 1978 г., из них часть записей — на волнах 2.0, 2.3, 2.7, 3.2 и 4.0 см — с помощью той же аппаратуры, на которой велись наблюдения Солнца, а также на волнах 2.08, 3.9 см с помощью других радиометров (наблюдения Н. С. Соболевой и М. Н. Наугольной).

В результате обработки записей Луны было установлено, что за период, выделенный для исследования спокойного Солнца (ноябрь—декабрь 1977 г.), подложка на записях Луны была стабильна по форме и величине и четко разбивалась на две составляющие; одна из них аппроксимируется гауссианой, которая является сверткой Луны с диаграммой щита, другая сверткой с диаграммой, создаваемой неоднородностью порядка $1/3—1/2$ щита. Амплитуда первой части подложки на волне 2.0 см составляла 12—15% от амплитуды Луны, а второй — 5—7%. С ростом длины волны амплитуды менялись как $1/\lambda^2$. Очевидно, что в рассматриваемый период рассеянный фон диаграммы на южном секторе РАТАНа с перископом был обусловлен в основном ошибками в установке щитов, составляющих отражающую поверхность антенны. Этот вывод был подтвержден позднее теоретическими и экспериментальными исследованиями природы рассеянного фона диаграммы РАТАНа.

Таким образом, определив структуру подложки по записям Луны, на каждой обрабатываемой записи Солнца мы провели подложку как сумму двух гауссиан, описанных выше. Примеры исключения подложки можно видеть на рис. 2, где приведены половины записей Солнца на всех пяти

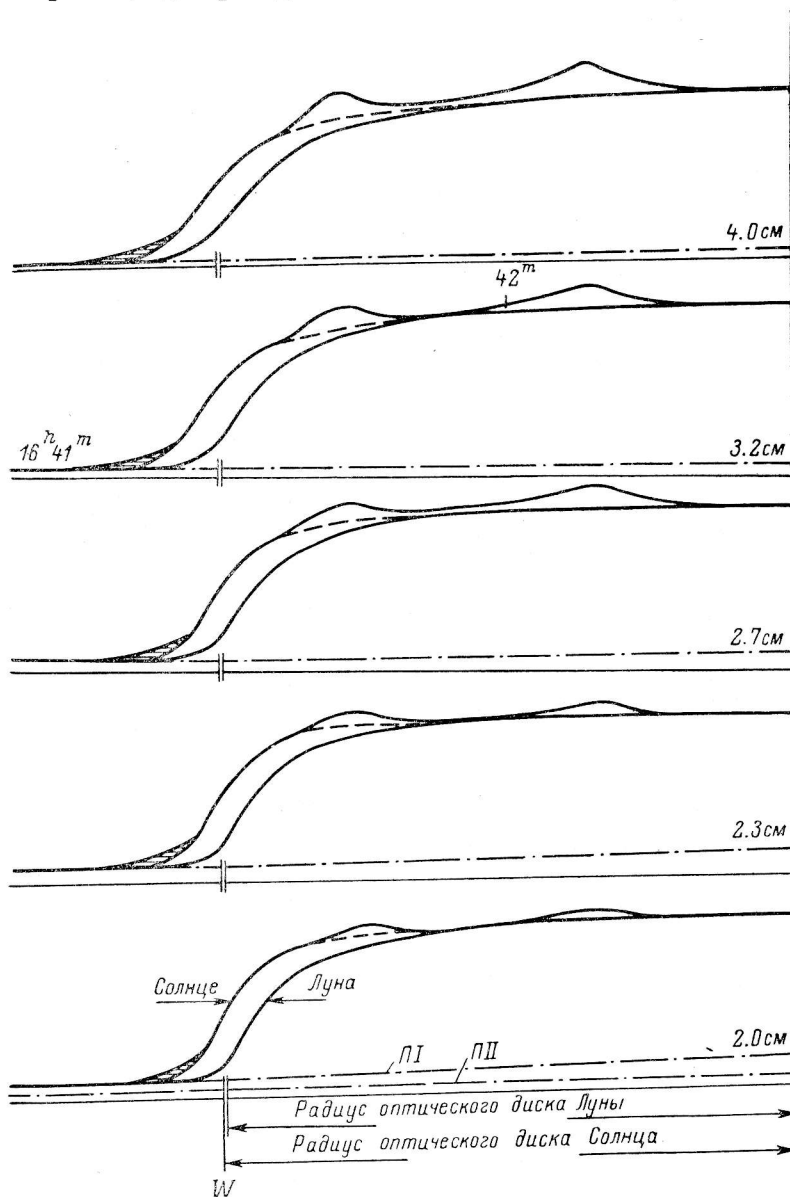


Рис. 2. Построенные в одном масштабе половины записей Солнца 04.12.77 и Луны 10.11.77 (E) и 08.12.77 (W) на разных волнах.

волнах за 04.12.77. Подложка проведена штрих-пунктиром, на записи на волне 2.0 см показаны две составляющих подложки П I и П II.

Исследование характеристик спокойного Солнца. На основе среднестатистического контура спокойного Солнца, перестроенного над подложкой, исследовались характеристики спокойного Солнца. На рис. 3, а показан среднестатистический контур спокойного Солнца на волне 3.2 см. Заштрихованные области показывают поле ошибок в определении параметров контура, обусловленное неоднозначным способом проведения подложки.

Распределение яркости по диску Солнца. Восстановление распределения яркости по диску Солнца из наблюдаемых контуров спокойного Солнца выполнялось на основе интегрального уравнения Абеля, которое связывает одномерное распределение яркости по диску $T_A(x)$ с радиальным $T_B(r)$:

$$T_A(x) = 2 \int_x^{\infty} \frac{T_B(r) r dr}{\sqrt{r^2 - x^2}}. \quad (1)$$

Учитывая достаточную узость диаграммы РАТАНа в направлении Е—W, в качестве одномерного распределения яркости $T_A(x)$ можно брать выделенные на записях контуры спокойного Солнца. Предположение о сферической симметрии в распределении радиояркости по диску спокойного Солнца было сделано на основе выводов работ [2, 13, 14], свидетельствующих об отсутствии заметной эллиптичности в радиоизображении Солнца в рассматриваемом диапазоне волн.

Для решения уравнения (1) диск разбивали на ряд колец, а уравнение заменялось системой линейных уравнений. Вертикальная диаграмма РАТАНа учитывалась введением соответствующей весовой функции в коэффициенты системы уравнений. В результате решения системы уравнений с помощью ЭВМ отыскивалась яркость в каждом кольце.

На рис. 4 приведены полученные таким способом распределения яркости по диску на пяти волнах. Осцилляции на приведенных кривых не солнечного происхождения, носят случайный характер и являются ошибками метода.

Из представленных на рис. 4 распределений можно сделать следующие выводы:

- 1) на всех пяти волнах яркость по диску спокойного Солнца распределена равномерно до $r=0.95 R_{\odot}$;
- 2) увеличение яркости (около 10%) на лимбе наблюдается на волне 4.0 см, с укорочением длины волны оно уменьшается и практически отсутствует на 2.0 см;
- 3) эффективные размеры радиодиска Солнца на всех рассмотренных длинах волн превышают размеры оптического диска и растут с увеличением длины волны;

- 4) вклад коронального излучения увеличивается с ростом λ .

Чтобы дать количественную характеристику перечисленным особенностям в распределении радиояркости по диску и оценить степень точности и неоднозначности полученных решений, их сравнивали с распределениями, восстановленными тем же методом (путем решения уравнения Абеля) из следующих кривых:

- а) записи Луны, полученной на южном секторе РАТАНа с перископом;
- б) расчетной кривой, полученной в результате двумерной свертки с диаграммой РАТАНа диска равномерной яркости с радиусом, близким радиусу оптического диска Солнца ($R=16'$).

В качестве примера рассмотрим результаты, полученные на волне 3.2 см. На рис. 5 кривая А — распределение яркости по диску, восстановленное из наблюдаемого контура спокойного Солнца (то же, что и на рис. 4), кривая В — восстановленное распределение яркости по диску Луны, кривая В — восстановленное распределение яркости по диску из свертки равномерно светящегося диска с диаграммой.

Видно, что полученное распределение яркости по Луне отличается от распределения, которое соответствует диску равномерной освещенности. Оно согласуется с распределением (со спаданием яркости к краю), которое было получено на волне 3.2 см на РТ-22 в работе [15].

По виду кривой В, являющейся восстановленным распределением яркости равномерно светящегося диска, можно судить о точности полученных решений и оценить величину эффекта антенного сглаживания. Оче-

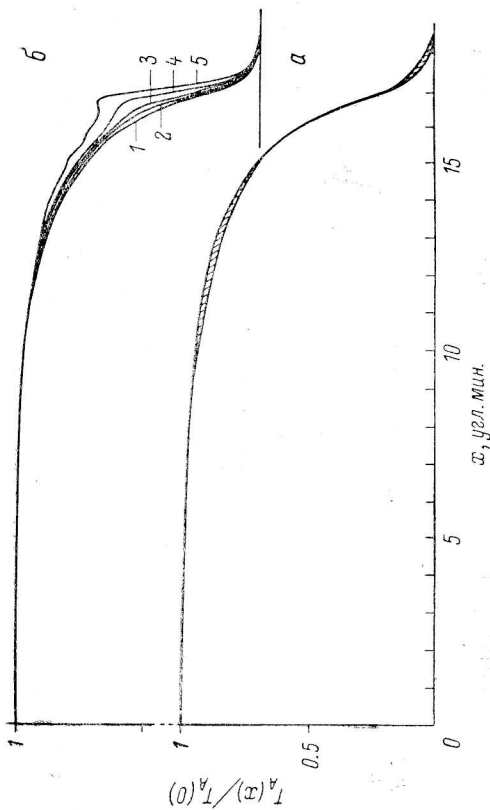


Рис. 3.

а — выделенный на записях среднестатистический контур спокойного Солнца на волне 3.2 см; б — двумерная свертка с диаграммой РАГАН диска с радиусом 17' со следующими вариантами распределения яркости по диску: 1 — равномерно светящийся диск, 2, 3, 4 и 5 — с уярчением на лимбе 10, 20, 50 и 100%.

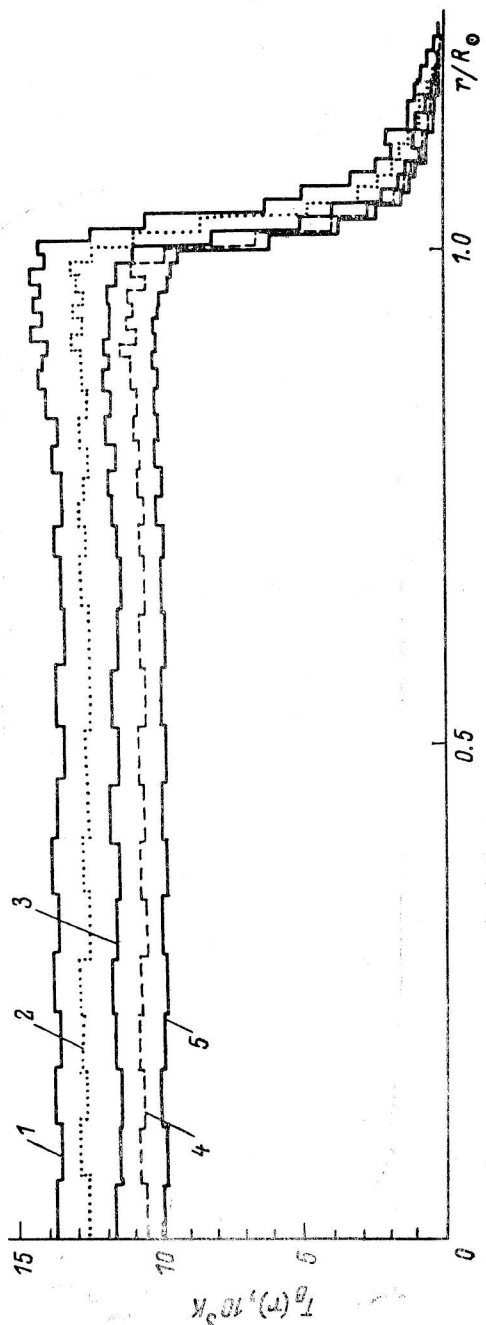


Рис. 4. Восстановленные из наблюдаемых контуров спокойного Солнца распределения радиояркости по диску $T_B(r)$.

Волна, см: 1 — 4.0, 2 — 3.2, 3 — 2.7, 4 — 2.3, 5 — 2.0.

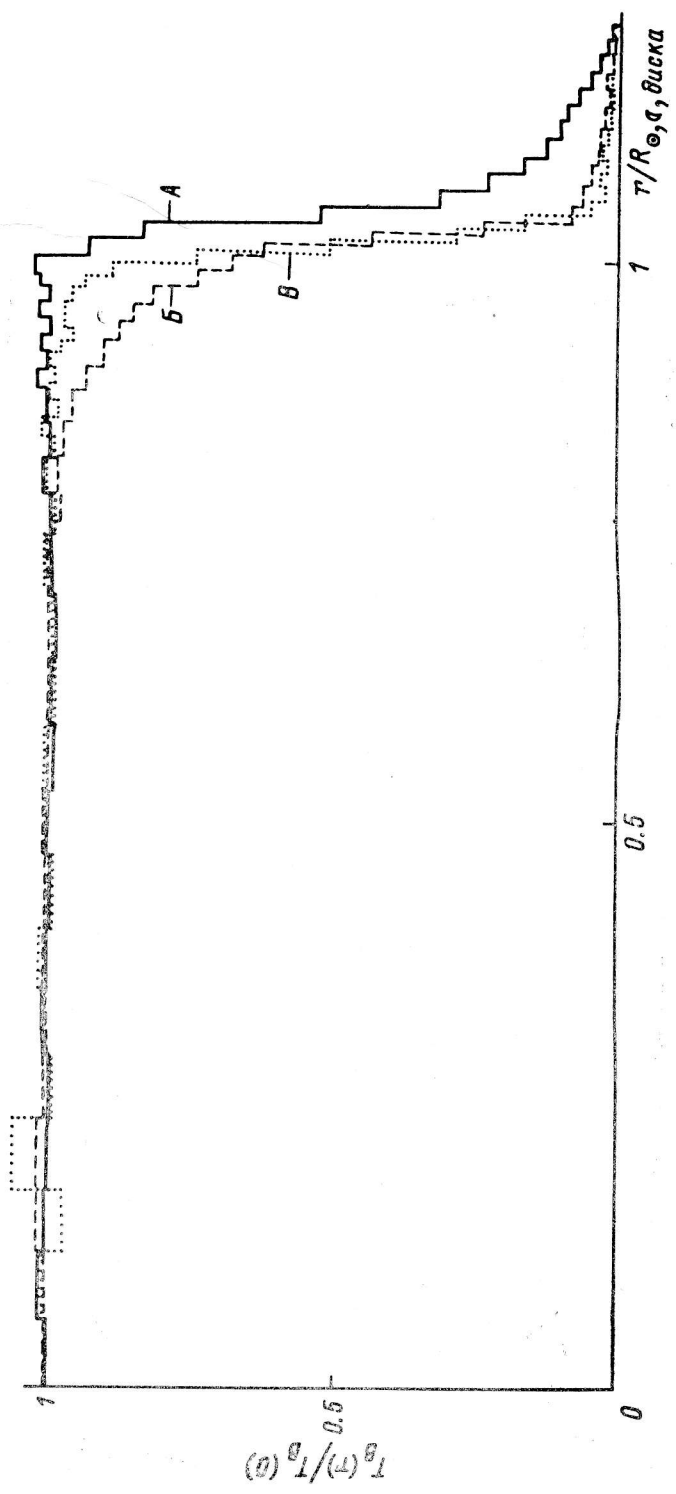


Рис. 5. Восстановленные распределения яркости по диску $T_B(r)$ на волне 3.2 см (см. текст).

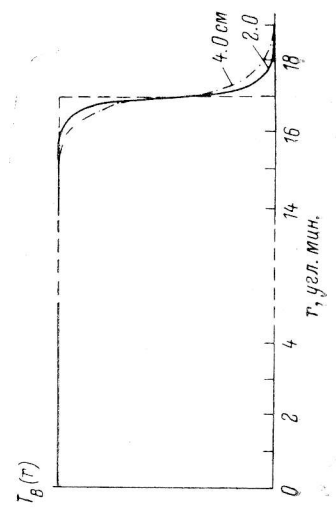


Рис. 6. Пример антенного сглаживания на волнах 2.0 и 4.0 см на восстановленных распределениях $T_B(r)$, соответствующих равномерно светящемуся диску ($R=17'$).

видно, что если бы антенна имела идеальную ножевую диаграмму, восстановленное распределение B имело бы форму прямоугольника. Поэтому полученные для Солнца распределения яркости $T_B(r)$ следует рассматривать с точностью до сглаживающего эффекта диаграммы, который в основном сказывается на участке распределения в районе края диска. На рис. 6 можно видеть, как этот эффект проявляется на крайних волнах рассматриваемого диапазона (2 и 4 см). Здесь приведены распределения $T_B(r)$, восстановленные из сверток равномерно светящегося диска радиуса $R=17'$ с диаграммой (осцилляции на кривых усреднены).

Таким образом, учитывая эффект антенного сглаживания, на основе полученного распределения A на рис. 4 можно утверждать, что на волне 3.2 см яркость распределена равномерно на большей части диска с точностью до 5%; на лимбе в полосе шириной 30—60'' имеется увеличение яркости примерно на 10% по сравнению с яркостью в центре диска (более тонкая структура в распределении яркости по диску спокойного Солнца не может быть выявлена из-за сглаживающего действия антенны).

Э ф ф е к т и в н ы й р а д и о р а д и у с С о л н ц а определялся как расстояние от центра до точки, где яркость падает наполовину. Такое определение основано на том факте, что в распределении B , соответствующем диску равномерной яркости, яркость падает наполовину на расстоянии, равном радиусу диска (с точностью до $0.003 R_\odot$). Для волны 3.2 см эффективный радиорadius Солнца оказался, согласно распределению A , равным $1.035 R_\odot$.

Определенный аналогичным образом из распределения B радиорadius Луны равен $(0.995 \pm 0.003) R_\odot$. Различие эффективных радиоразмеров Солнца и Луны иллюстрирует рис. 2. Здесь приведены половины записей Солнца и Луны, совмещенные по оси прямых восхождений и построенные в одном масштабе. Приведена восточная часть записи Луны за 10.11.77, которая практически совпала с западной половиной записи Луны за 08.12.77 (в обоих случаях радиофаза Луны полная). Выбраны такие дни, когда размеры и времена прохождения через диаграмму РАТАНа оптических дисков Солнца и Луны были близки:

Солнце (4.12.77)	$R_\odot = 16'25$	$t_{s\odot} = 70^s4$
Луна (10.11.77)	$R_\oplus = 16'44$	$t_{s\oplus} = 69^s6$
Луна (08.12.77)	$R_\oplus = 16'43$	$t_{s\oplus} = 70^s3$

Видно, что записи, представленные в одном масштабе, имеют существенно разные размеры, что прямо свидетельствует о различии эффективных размеров радиодисков Солнца и Луны.

Я р к о с т н а я т е м п е р а т у р а с п о к о й н о г о С о л н ц а в ц е н т р е д и с к а. Абсолютная калибровка шкалы яркостной температуры в восстановленных распределениях $T_B(r)$ на рис. 4 осуществлялась через интегральные потоки радиоизлучения Солнца, которые принимались равными:

λ , см	2.0	2.3	2.7	3.2	4.0
F , 10^{-22} Вт/(м ² · Гц)	517	423	333	268	183

Эти значения соответствуют результатам интерполяции минимальных значений потоков Солнца, измеренных в ноябре—декабре в период минимума солнечной активности (1975 и 1976 г.) на ряде волн сантиметрового диапазона на станциях Тойакава (Япония), Оттава (Канада) и Гавана (Куба).

Для волны 3.2 см яркостная температура в центре диска оказалась равной 12500 К (согласно восстановленному распределению яркости и выбранному способу калибровки).

Оценка коронального излучения Солнца. Сравнивая запись Солнца и Луны, полученные с одной и той же диаграммой антенны, можно на записях Солнца на фоне рассеянного поля диаграммы выделить участки, обусловленные излучением короны (на рис. 2 эти участки заштрихованы). Оценка яркостной температуры этого излучения была сделана в результате сравнения восстановленных распределений $T_B(r)$ из наблюдаемых контуров Солнца и Луны. При этом точность оценки яркостной температуры не зависела от способа проведения подложки и от ее структуры, так как на записях Солнца и Луны она проводилась одинаковым образом.

Для Солнца волны 3.2 см получено, что на расстоянии $r=1.1 R_\odot$ яркостная температура излучения равна 1100 К, что составляет $\sim 9\%$ от температуры в центре диска.

Независимым контролем правильности выводов, сделанных о характере распределения яркости по диску спокойного Солнца, служило сравнение наблюдаемых контуров спокойного Солнца с расчетными кривыми, которые были получены как двумерная свертка с диаграммой антенны дисков с различными вариантами распределения яркости по ним. Расчет диаграммы РАТАНа производился с помощью ЭВМ (алгоритм счета предложен Г. Б. Гельфрейхом [16]) на основе измеренного распределения поля в раскрыве антенны с учетом реальных условий наблюдений (высоты источника над горизонтом, положения облучателя в фокальной плоскости и др.). Параметры рассчитанной диаграммы РАТАНа сравнивались с реально измеренными параметрами диаграммы по результатам наблюдений опорных источников, а также с результатами расчета диаграммы, выполненного другими способами [17, 18].

Результаты сравнения наблюдаемого контура с расчетными кривыми на волне 3.2 см можно видеть на рис. 3, б. Здесь кривая 1 — свертка с диаграммой равномерно освещенного диска, кривые 2, 3, 4 и 5 соответствуют дискам, яркость по которым распределена таким образом, что на лимбе имеется полоса шириной $30''$, яркость которой превышает яркость центральной части диска на 10, 20, 50 и 100% соответственно. Видно, что из всех представленных кривых кривые 1 и 2 наиболее близки по форме к наблюдаемому контуру спокойного Солнца (сглаживающий эффект диаграммы и точность определения параметров контура не позволяет отдать предпочтение одной из этих двух кривых). Более полное совпадение наблюдаемого контура и расчетной кривой для волны 3.2 см достигается, если к диску, с которым рассчитывается свертка, добавить внешнее кольцо шириной $1-2'$, яркость которого составляет 10—15% от яркости в центре диска; внутренний радиус кольца при этом должен равняться $(1.033 \div 1.035)R_\odot$. Естественно, что такое распределение яркости по диску полностью согласуется с тем, которое восстановлено из наблюдаемого контура спокойного Солнца путем решения уравнения Абеля.

В качестве дополнительного контроля использовались записи Луны. Сравнение наблюдаемого контура Луны с расчетными кривыми на волне 3.2 см показало, что он аппроксимируется сверткой диска, размер которого с точностью до 1% совпадает с размером оптического диска Луны, а распределение яркости по нему с точностью до 10% совпадает с тем распределением, которое приведено в работе [15] для волны 3.2 см.

В заключение укажем, что исследование характеристик спокойного Солнца на основе результатов наблюдений Солнца на РАТАНе на волнах 2.0, 2.3, 2.7 и 4.0 см проводилось по той же методике, что и на волне 3.2 см. Основные результаты проведенного исследования сведены в таблицу, где даны следующие характеристики радиоизлучения спокойного Солнца: T_{B_\odot} — яркостная температура в центре диска, ΔT_B — уярчение на лимбе (в процентах от T_{B_\odot}), T_{B_k} — яркостная температура на расстоянии $1.1 R_\odot$ от центра диска, $R_{эф}$ — эффективный радиус Солнца (в долях R_\odot).

λ , см	2.0	2.3	2.7	3.2	4.0
$T_{B\odot}$, К	10100	10600	11500	12500	13900
$\Delta T_{B\odot}$, %	< 5	≤ 5	< 10	< 10	≤ 10
T_{BR} , К	400	550	700	1100	1500
R_{Φ}/R_{\odot}	1.024	1.029	1.032	1.035	1.052

Обсуждение результатов. В качестве исходной поправки представляет интерес сравнить оценки, полученные из наблюдений распределений яркости по диску спокойного Солнца, с теоретически рассчитанными распределениями для однородной модели невозмущенной солнечной атмосферы.

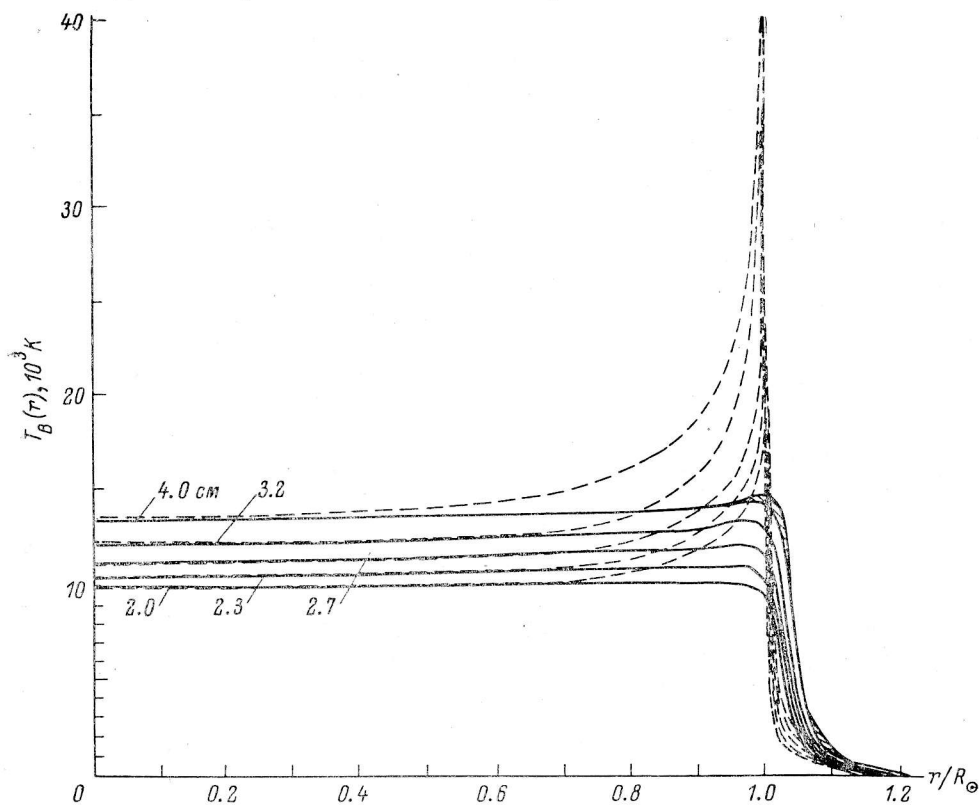


Рис. 7. Сравнение восстановленных из наблюдаемых контуров спокойного Солнца распределений яркости по диску $T_B(r)$ (сплошные линии) с расчетными, соответствующими однородной модели невозмущенной солнечной атмосферы (штриховые линии).

Результаты сравнения можно видеть на рис. 7. Здесь показаны восстановленные из наблюдаемых контуров распределения $T_B(r)$ (на примере волны 4.0 см показана область неоднозначности решения из-за сглаживающего эффекта диаграммы). Расчеты выполнялись в рамках теплового тормозного излучения с учетом рефракции в атмосфере Солнца (программа для вычислений на ЭВМ составлена А. Н. Коржавиным).

В качестве модели невозмущенной солнечной атмосферы для расчетов была выбрана модель Реймерса [19], построенная на основе результатов оптических, УФ- и радионаблюдений Солнца.

Видно, что измеренные на РАТАНе значения яркостных температур в центре диска, которые оказались очень близки тем, какие были получены на РТ-22 [20], хорошо совпали с расчетными для однородной модели. Также близкими к расчетным оказались полученные из наблюдений оценки яркостных температур за пределами оптического диска Солнца

на расстоянии $1.1 R_{\odot}$. Их величина и характер зависимости от λ подтверждают представление о короне как об оптически прозрачной среде для волн сантиметрового диапазона на высоте более 70 000 км над фотосферой.

Однако существенные расхождения между наблюдаемыми и расчетными распределениями T_B на рис. 7 видны в районе лимба. Это доказывает, что однородная модель не подходит для описания реального распределения температуры и электронной плотности в переходном слое и прилегающих к нему верхней хромосфере и нижней короне.

В настоящее время известен ряд работ, в которых для интерпретации наблюдаемого равномерного распределения радиояркости по диску спокойного Солнца (с отсутствием уярчения на лимбе) в коротковолновой части сантиметрового диапазона радиоволн рассматриваются различные неоднородные модели невозмущенной солнечной атмосферы [21—24]. Чтобы объяснить наблюдаемые значения эффективных радиорadiusов, необходимо предположить существенно неоднородную структуру с большой скважностью областей, ответственных за сантиметровое излучение, — верхней хромосферы, переходного слоя и нижней короны. Рентгеновские и УФ-наблюдения Солнца, выполненные на космической станции «Скай-лэб», подтверждают неоднородную структуру этих областей [25].

Наиболее полно наблюдаемые в сантиметровом диапазоне радиоволн характеристики спокойного Солнца интерпретируются в рамках модели Лантоса [24, 27], в которой невозмущенная корона состоит из корональных дыр и арок. Расчеты, произведенные в рамках этой модели с учетом спикул [28, 29], дали следующие ожидаемые характеристики спокойного Солнца: для волн с $\lambda \leq 3$ см — равномерное и сферически-симметричное распределение радиояркости по диску, отсутствие уярчения на лимбе; эффективные радиорadiusы равны $1.016 R_{\odot}$ (1.5 см), $1.026 R_{\odot}$ (2.8 см) и $1.062 R_{\odot}$ (6 см); характеристики спокойного Солнца не меняются в течение цикла солнечной активности.

Как видно, эти расчетные характеристики хорошо совпадают с полученными на РАТАНе и ранее на БПР для коротковолновой части сантиметрового диапазона.

Автор благодарен Г. Б. Гельфрейху и А. Н. Коржавину за полезную дискуссию, Д. В. Королькову и О. И. Крат — за обсуждение ряда методических вопросов, Н. С. Соболевой и М. Н. Наугольной — за предоставление записей Луны. Автор признателен А. Ф. Смирнову за помощь в наблюдениях и Н. Е. Гольневой — за расчеты эфемерид Луны.

Поступила в редакцию
15.11.79

Список литературы

1. Молчанов А. П. Радиоизлучение края солнечного диска. — В кн.: Радиоизлучение Солнца, 1969, № 1, с. 5—16.
2. Бачурин А. Ф., Дворяшин А. С., Цветков Л. И. Об изменении диаметра радиоизображения Солнца в коротковолновой части см-диапазона. — Изв. КРАО, 1978, 58, с. 40—43.
3. Furst E., Hachenberg O., Hirth W. The centre to limb variation of the Sun at centimeter wavelengths. — *Astron. and Astrophys.*, 1974, 36, p. 123—133.
4. Боровик В. Н. Радиоизлучение спокойного Солнца на волне 3.2 см и его связь с фазой цикла солнечной активности. — *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО), 1979, 11, с. 107—120.
5. Боровик В. Н. Распределение радиояркости по диску спокойного Солнца на волне 3.2 см и его связь с фазой цикла солнечной активности. — Тезисы докладов на 10-й Всесоюзной конференции по радиоастрономическим исследованиям солнечной системы. Иркутск, 1977, с. 8.
6. Боровик В. Н. Спектральные характеристики B -компоненты радиоизлучения Солнца в коротковолновой части см-диапазона по наблюдениям на БПР. — Там же, с. 6.

7. B o r o v i k V. N. The results of the quiet Sun radio observations in the wavelength range of 2—4 cm with RATAN-600. — Abstracts of XII YERAC, Pushchino, 1979, p. 39—40.
8. Берлин А. Б., Есепкина Н. А., Зверев Ю. К., Кайдановский Н. Л., Корольков Д. В., Копылов А. И., Коркин Э. И., Парийский Ю. Н., Рыжков Н. Ф., Соболева Н. С., Стоцкий А. А., Шиврис О. Н. Новый радиотелескоп Академии Наук РАТАН-600. — Приборы и техника эксперимента, 1977, 5, с. 8—16.
9. Богод В. М., Болдырев С. И., Ипатова И. А., Корольков Д. В., Романцов В. В. Спектрально-поляризационный комплекс радиометров. — Солнечные данные, 1976, № 11, с. 93—98.
10. Christiansen W. N., Warburton J. A. The distribution of radio brightness over the solar disk at wavelength of 21 cm. — Austral. J. Phys., 1955, 8, p. 474—486.
11. Богод В. М. Измерения параметров радиогрануляции на радиотелескопе РАТАН-600. — Сообщ. САО, 1978, 23, с. 22—42.
12. Chiuderi-Drago F., Fürst E., Hirth W., Lantos P. Limb brightening and dark features observed at 6 cm wavelengths. — Astron. and Astrophys., 1975, 39, p. 429—434.
13. Молчанов А. П. Некоторые результаты радиоастрономических наблюдений солнечных затмений. — Изв. ГАО, 1964, 177, с. 38—56.
14. Боровик В. Н., Вейсиг Г. С. Определение эллиптичности Солнца из радионаблюдений на волне 3.2 см. — Солнечные данные, 1963, № 10, с. 73—76.
15. Кощенко В. Н., Лосовский Б. Я., Саломонович А. Е. Радиоизлучение Луны на волне 3.2 см. — Изв. вузов, Радиофизика, 1961, 4, № 4, с. 596—599.
16. Гельфрейх Г. Б. Об одном алгоритме расчета диаграммы антенны типа РАТАН-600 с учетом аббераций и поляризационных эффектов. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1977, 9, с. 89—98.
17. Коржавин А. Н. Диаграмма направленности антенны переменного профиля для реальных режимов работы. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1977, 9, с. 71—88.
18. Есепкина Н. А., Бахвалов Н. С., Васильев Б. А., Васильева Л. Г., Темирова А. В. Расчет диаграммы направленности радиотелескопа РАТАН-600 с учетом аббераций. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1979, 11, с. 197—207.
19. Reimers D. On the solar transition layer and solar active region. — Astron. and Astrophys., 1971, 14, p. 198—209.
20. Бачурин А. Ф., Ерюшев Н. Н. О яркостной температуре «спокойного» Солнца в сантиметровом диапазоне. — Изв. КрАО, 1976, 54, с. 241—243.
21. Гельфрейх Г. Б., Коржавин А. Н. Распределение яркости на лимбе в полярной зоне диска по наблюдениям затмения 9 мая 1967 года на волне 4.0 см. — Солнечные данные, 1969, № 11, с. 102—112.
22. Elzner L. R. The centre to limb variation of optically thin UV-lines and at centimetric wavelengths and the influence of spicules. — Astron. and Astrophys., 1976, 47, p. 9—18.
23. Kanno M., Tanaka R. The geometry of the chromosphere-corona transition region inferred from the centre to limb variation of the radio emission. — Solar Phys., 1975, 43, p. 63—77.
24. Lantos P. The reinterpretation of the results of the quiet Sun observations at the cm-wavelengths. — Astron. and Astrophys., 1978, 69, p. 69—80.
25. Feldeman A., Mariska K., Doschek P. On the structure of the solar transition zone and lower corona. — Astrophys. J., 1979, 229, N 1, p. 369—374.
26. Боровик В. Н. Распределение радиояркости по диску спокойного Солнца на волне 3.2 см по наблюдениям на Большом пулковском радиотелескопе. — В кн.: Проблемы физики атмосферы. Физика современного изменения климата. Л., Изд-во Ленингр. ун-та, 1980, вып. 16.
27. Trottet G., Lantos P. Brightness temperature of solar corona holes and arches at metric wavelengths and coherence between radio and UV-observations. — Astron. and Astrophys., 1978, 70, p. 245.
28. Fürst E., Hirth W., Lantos P. The radius of the Sun at centimeter waves and the brightness distribution across the disk. — Solar Phys., 63, 1979, N 2, p. 257.
29. Lantos P., Fürst E., Hirth W. The variation of the solar brightness at the extreme solar limb at centimeter radio waves. — Solar Phys., 63, 1979, N 2, p. 271.