

УДК 523.9-847-77

ОСОБЕННОСТИ САНТИМЕТРОВОГО СОЛНЕЧНОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЯ НА РАТАН-600 СОЛНЕЧНОГО ЗАТМЕНИЯ 29 МАРТА 2006 ГОДА

© 2026 О. А. Голубчина^{1*} ¹ Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 18 января 2026 года; после доработки 21 апреля 2026 года; принята к публикации 18 июня 2026 года

В работе представлен обзор основных результатов исследования источников радиоизлучения северной полярной (СП) области Солнца и северо-западного (СЗ) лимба Солнца, открытых во время наблюдений максимальной фазы ($\Phi = 0.998$) солнечного затмения 29 марта 2006 года в микроволновом диапазоне 1.03–30.7 см на радиотелескопе РАТАН-600. При обработке наблюдений использовалось моделирование радиоизлучения Солнца и Луны в предположении круговой симметрии. Получены оценки уменьшения яркостных температур солнечного радиоизлучения в области корональной дыры (КД) в исследуемом диапазоне. Обсуждаются полученные распределения яркостной температуры и электронной концентрации открытого СЗ-участка диска Солнца с удалением от центра его оптического диска. Рассматривается вопрос о возможной нижней границе формирования солнечного ветра от исследуемых открытых СП-области и СЗ-лимба Солнца.

Ключевые слова: *астрометрия и механика небесных тел: затмения — Солнце: радиоизлучение — Солнце: корона — Солнце: магнитные поля*

1. ВВЕДЕНИЕ

Наблюдение солнечной короны во время солнечного затмения представляет большой научный интерес, поскольку закрытие Солнца Луной устраняет мешающий солнечный фоновый сигнал. Наблюдения солнечного затмения 29 марта 2006 года выполнены и исследованы специалистами из разных стран в различных диапазонах длин волн — белом свете, радиодиапазоне, рентгеновском и ультрафиолетовом — с привлечением данных со спутников (Pasachoff et al., 2007, 2008; Wang et al., 2007; Reginald et al., 2009a,b).

Настоящая работа посвящена обзору наиболее значимых результатов наблюдения радиоизлучения Солнца во время максимальной фазы этого затмения на радиотелескопе РАТАН-600 в диапазоне сантиметровых и дециметровых длин волн (1.03–30.7) см. Особый интерес представляет то, что исследование затменного Солнца выполнено практически одновременно в широком диапазоне длин волн. В данной работе представлены финальные результаты этого исследования. Методы наблюдения и обработки данных подробно описаны в работах Golubchina and Golubchin (1981),

Golubchina et al. (2011). В Таблице 1 приведены угловые размеры горизонтальной и вертикальной диаграмм направленности радиотелескопа РАТАН-600.

Используя нестандартный метод — “эстафету” (Golubchina and Golubchin, 1981), в ходе единственного сеанса на РАТАН-600 в диапазоне длин волн 1.03–30.7 см удалось получить уникальные данные о радиоизлучении Солнца, соответствующие максимальной фазе солнечного затмения. Центр диаграммы направленности антенны (ДНА) был смещен на 15' к северу от центра оптического диска Солнца. При использовании метода “эстафеты” время прохождения Солнца (Луны) через ДНА с учетом боковых лепестков составляет 300 с. Рупора приемников для разных длин волн расположены на облучателе в различных точках относительно фокуса антенны. И только волновод для $\lambda = 1.38$ см расположен непосредственно в фокусе. Моменты прохождения источника через ДНА для остальных длин волн рассчитывают исходя из положения соответствующих волноводов относительно волновода на $\lambda = 1.38$ см. Для этих моментов времени выполняют моделирование наблюдаемого источника радиоизлучения на заданной длине волны и вычисляют координаты Солнца и Луны. В результате мы можем сравнивать модель и полученную запись радиоизлучения на момент

*E-mail: golubchina_olga@mail.ru

Таблица 1. Угловые размеры горизонтальной (r_h) и вертикальной (r_v) диаграмм направленности антенны в различных полосах радиодиапазона

Wavelength, cm	1.03	1.38	2.7	6.2	13	30.7
$r_h \times r_v$, arcmin	0.4×17.3	0.6×19.3	1.2×19.4	2.6×25.0	5.7×35.8	13.4×84.4

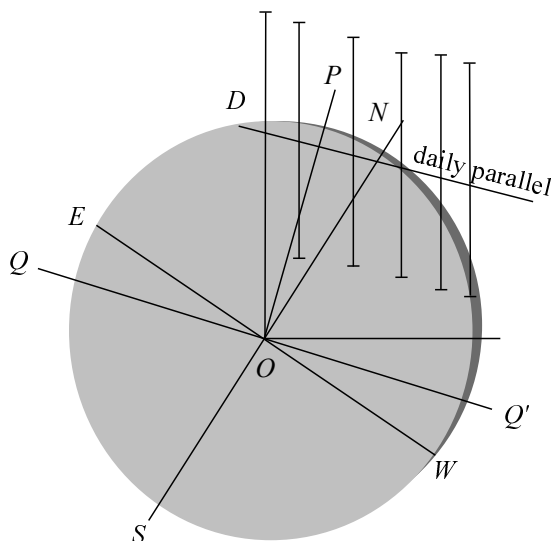


Рис. 1. Проекция небесных осей на диск Солнца: (E–W) и (S–N) — направления на восток–запад и юг–север Солнца; OD — положение вертикальной диаграммы направленности радиотелескопа (ДНА); OP и ON — направления на Северный полюс мира и северный полюс Солнца; Q–Q' — проекция небесного экватора; daily parallel — направление движения Солнца через ДНА. Темный участок по краю диска соответствует северной и СЗ открытым областям Солнца на момент максимальной фазы солнечного затмения (Golubchina and Korzhavin, 2014).

прохождения Солнца и Луны через центр ДНА. Координаты Луны и Солнца были рассчитаны на 300 с (Golubchina et al., 2011), что позволило определить их взаимное положение (рис. 1) и зафиксировать максимальную фазу солнечного затмения ($\Phi = 0.998$) на момент наших наблюдений.

В работах Fisk and Schwadron (2001), Abramenko et al. (2006) рассматривается вопрос о магнитном поле вблизи полюсов Солнца в период минимальной солнечной активности — в условиях, благоприятных для проявления КД. Согласно нашим радионаблюдениям на дециметровых волнах (13.01 и 30.7 см), в работе зафиксирован факт существования КД вблизи северного полюса Солнца, а также приведена оценка уменьшения яркостной температуры радиоизлучения в области КД в указанном диапазоне. Впервые предположение о постоянном истечении потока частиц от Солнца высказал английский астроном Кэррингтон в 1859 году. В 1958 году астрофизик Юджин Паркер (США) теоретически предсказал существование

солнечного ветра — непрерывного потока заряженных частиц, испускаемых Солнцем. Солнечный ветер состоит из высокоэнергичных частиц и электромагнитных волн, распространяющихся за пределы Солнечной системы. В настоящее время основными источниками солнечного ветра считаются корональные дыры на спокойном Солнце, полярные КД и корональные выбросы массы. В работе показана возможность существования солнечного ветра из открытой СП-области Солнца, обусловленного излучением открытого СЗ-лимба Солнца (в диапазоне 1.38–30.7 см) во время максимальной фазы солнечного затмения 29 марта 2006 года на радиотелескопе РАТАН-600, только на расстояниях $r < 1.2 R_{\odot}$ от центра диска Солнца.

2. ОЦЕНКА ЯРКОСТНЫХ ТЕМПЕРАТУР

Радиоизлучение открытой СП-области Солнца на разных длинах волн во время максимальной фазы солнечного затмения получено нами после вычитания сигнала от Луны из суммарной записи радиоизлучения Солнца и Луны (рис. 2).

Полярные КД всегда видны на полюсах Солнца в периоды минимальной солнечной активности, так как в это время преобладает вращательно ориентированная дипольная компонента магнитного поля (Abramenko et al., 2006; Fisk and Schwadron, 2001). По данным наблюдений солнечного затмения 29 марта 2006 года (Pasachoff et al., 2007, 2008; Wang et al., 2007, Reginald et al., 2009a,b), в различных диапазонах длин волн обнаружена КД вблизи северного полюса Солнца. Во время наблюдения максимальной фазы затмения СЗ-участок Солнца был открыт. Для оценки пониженной яркостной температуры в СП-области мы использовали яркостную температуру открытого СЗ-участка в качестве опорной величины: на каждой длине волны минимальную яркостную температуру в полярной зоне сопоставляли с максимальной яркостной температурой на СЗ-участке. Процентное отношение этих величин обозначим как A ($A = \min/\max$ %), а уменьшенную яркостную температуру — как B . Значения A и B приведены в таблице 2. Наблюдаемое понижение отношения $\min/\max$ на сантиметровых волнах свидетельствует об уменьшении яркостной температуры в полярной зоне (рис. 2) и служит подтверждением существования КД в этой области Солнца (таблица 2).

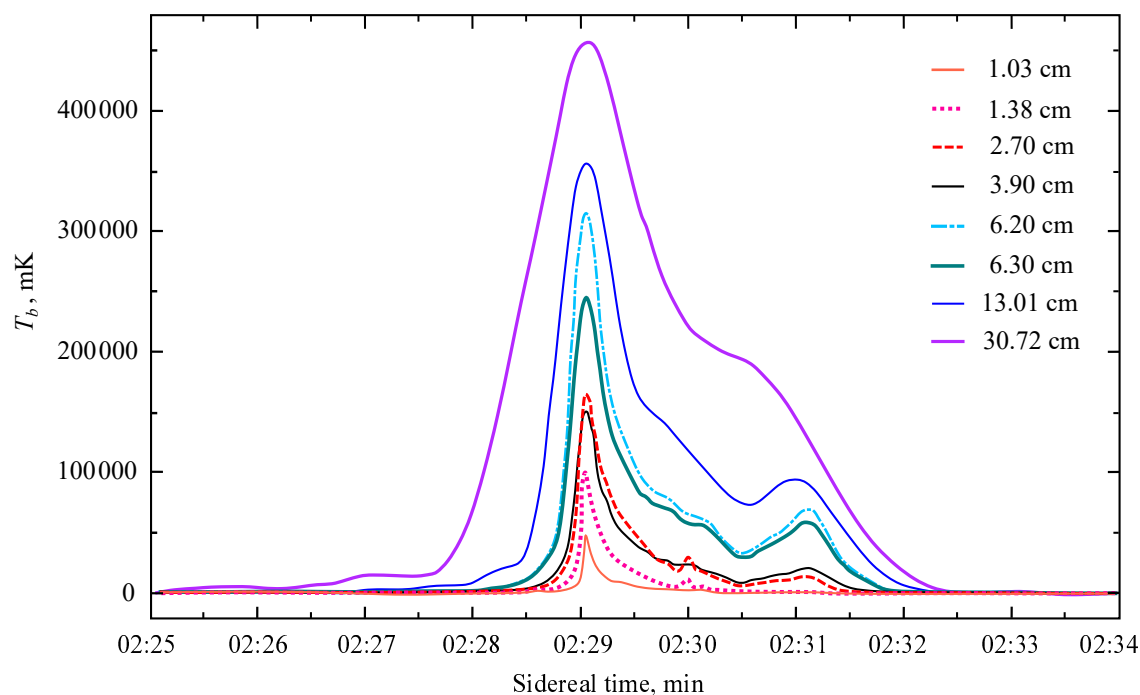


Рис. 2. Яркостная температура солнечного радиоизлучения (очищенного от радиоизлучения Луны) открытой СП-области на разных длинах волн во время максимальной фазы затмения Солнца.

Таблица 2. Относительные характеристики яркостных температур радиоизлучения Солнца

Wavelength, cm	A, %	B, %
30.7	44.2	55.8
13.01	19.8	80.2
6.3	11.6	88.4
6.2	10.5	89.5
3.9	5.3	94.7
2.7	4.8	95.2
1.38	3.08	96.92

Значения B показали значительное уменьшение яркостной температуры T_b радиоизлучения Солнца на волнах 30.7, 13.01 см, незначительное уменьшение T_b на волнах 6.2, 6.3 см и практическое отсутствие уменьшения T_b на волнах 3.9, 2.7, 1.38 см. Это свидетельствует о проявлении КД на более длинных, дециметровых волнах и об отсутствии ее проявления на коротких волнах сантиметрового диапазона. Оценки, приведенные в таблице 2, убедительно показывают существование полярной корональной дыры на волнах 13.01, 30.7 см.

3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ

Для определения электронной концентрации (N_e) в открытой СЗ-области Солнца (см. рис. 3), мы использовали значения яркостных температур, полученные при обработке наблюдений максимальной фазы затмения 29 марта 2006 года на радиотелескопе РАТАН-600 в диапазоне 1.03–30.7 см (рис. 4, 5). Заметим, что определение N_e выполнено нами в первом приближении с помощью моделирования радиоизлучения Солнца и Луны. Модели Солнца и Луны представлялись сферически-симметричными, состоящими из концентрических колец с равномерным распределением яркости внутри каждого кольца (Golubchina and Korzhavin, 2013). Хорошее согласие модельных и наблюдаемых кривых радиоизлучения Солнца во время затмения (Golubchina and Korzhavin, 2013) подтверждает корректность оценки электронной концентрации в исследуемой области.

Методика определения N_e подробно описана в работах Golubchina and Korzhavin (2014) и Golubchina (2025); полученные результаты представлены в таблице 3. Ниже кратко изложим процедуру расчета.

Рассмотрение ведется в картинной плоскости. При анализе выбранной области Солнца мы полагаем длину оптического пути по лучу зрения (DL) равной размеру вертикальной ДНА (см. таблицу 1) на уровне 0.01: $DL = 2 \times 10^9$ см

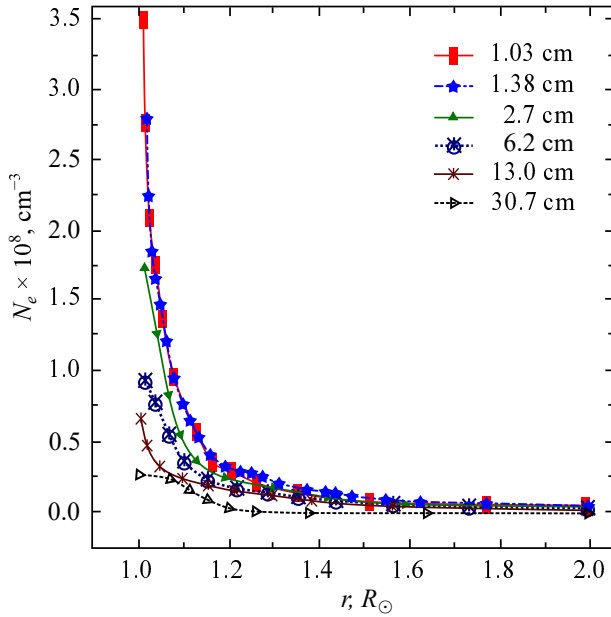


Рис. 3. Распределение электронной концентрации открытой СЗ корональной области Солнца на расстояниях $(1.005\text{--}2.0) R_\odot$ от центра оптического диска Солнца по данным наблюдений на волнах 1.03, 1.38, 2.7, 6.2, 13.0, 30.7 см во время максимальной фазы солнечного затмения 29 марта 2006 года.

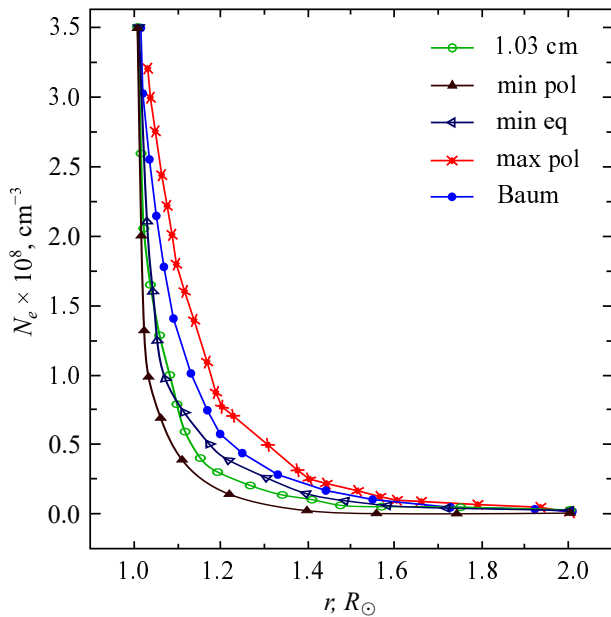


Рис. 4. Распределение электронной концентрации: для СЗ-лимба Солнца по измерениям яркостной температуры на волне 1.03 см; для полярной и экваториальной областей Солнца по наблюдениям в белом свете во время полных солнечных затмений, в период минимальной солнечной активности (min pol и min eq); для СП-области по наблюдениям в белом свете в период максимальной солнечной активности (max pol); рассчитанное по формуле Баумбаха–Аллена (Baum).

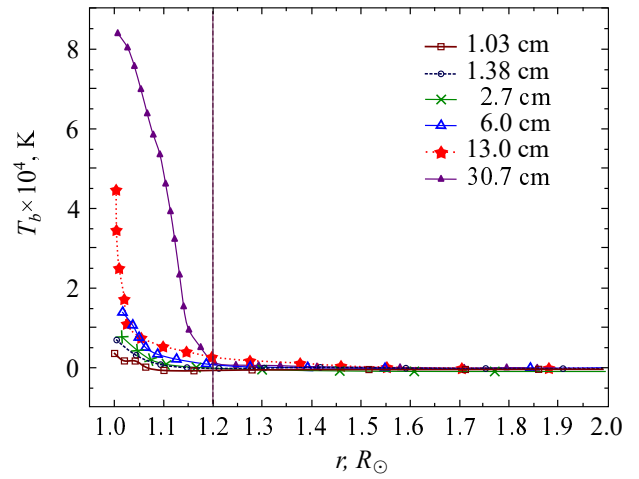


Рис. 5. Распределение яркостной температуры СП-области Солнца на интервале расстояний $(1.005\text{--}2.0) R_\odot$ от центра оптического диска Солнца на разных длинах волн.

Таблица 3. Электронная концентрация открытой СЗ-области Солнца

Wavelength, cm	$N_e \times 10^8, \text{cm}^{-3}$
1.03	3.04
1.38	2.7
2.7	1.55
6.3	0.85
13.01	0.70
30.7	0.25

для $\lambda = 1.03\text{--}6.2$ см и $DL = 7 \times 10^{10}$ см для $\lambda = 13.0\text{--}30.7$ см. На основе этих данных рассчитываем яркостную температуру ($T_b = T_e \mu(r) DL$), оптическую глубину ($\mu(r)DL$) и электронную температуру (T_e). Коэффициент поглощения задается соотношением: $\mu(r) = 10^{-21} \times 0.19(N_e)^2 T_e^{-3/2} \lambda^2$ (Sobolev, 1964; Zheleznyakov, 1964). Электронная концентрация вычисляется по формуле Баумбаха–Аллена (Zheleznyakov, 1964):

$$N_e(r) = [T_b / 10^{-21} \times 0.19 \lambda^2 (T_e)^{-1/2} DL]^{1/2},$$

где $T_e = 1.4 \times 10^6$ — постоянная величина, а T_b — результаты моделирования.

Итоговые значения N_e приведены в таблице 3 и на рис. 3, 4 (Golubchina and Korzhavin, 2014; Golubchina, 2025).

Распределение электронной концентрации в открытой СЗ-области Солнца на расстояниях от $1.005 R_\odot$ до $2 R_\odot$ по данным измерений на волнах 1.03 см близко к распределениям, полученным в

белом свете в эпоху минимальной солнечной активности (min pol) (Sobolev, 1964; Zheleznyakov, 1964; Golubchina and Korzhavin, 2014; Golubchina, 2025).

4. ТЕМПЕРАТУРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Солнечный ветер в основном состоит из электронов, протонов, ядер гелия (α -частиц), ядер других элементов и неионизированных (электрически нейтральных) частиц. Обзорная статья Cranmer (2009) дает полное представление об основных механизмах формирования солнечного ветра. Судить о его наличии по результатам наших измерений на радиоволнах 1.03–30.7 см в открытой СЗ-области Солнца мы не можем, поскольку точность измерений $T_a = 1$ К, а минимальная яркостная температура радиоизлучения открытой СП-области Солнца ($T_b \sim 0$ К) на всех волнах наших наблюдений зарегистрирована на расстоянии около $1.2 R_\odot$ (7.6×10^5 км) от центра оптического диска Солнца (рис. 5). Основываясь на полученных данных, мы предполагаем, что в период максимальной фазы затмения солнечный ветер обусловлен излучением открытого СЗ-лимба Солнца только вблизи солнечного диска, на расстояниях менее $1.2 R_\odot$. Этот аспект нужно учитывать при исследовании Солнца на близких дистанциях с помощью космических аппаратов.

На коротких длинах волн (1.03–2.7 см) резкого снижения яркостной температуры в зоне от $1.005 R_\odot$ до $1.03 R_\odot$ не выявлено. Радиоизлучение в этой спектральной области преимущественно генерируется в верхней хромосфере и нижней короне. Отсутствие резкого уменьшения яркостной температуры, вероятно, связано с влиянием хромосферы и корональных петель на радиоизлучение в коротковолновом диапазоне (Wang et al., 2007; Golubchina and Korzhavin, 2014).

5. ВЫВОДЫ

Обобщая результаты наблюдения максимальной фазы солнечного затмения 29 марта 2006 года на радиотелескопе РАТАН-600, а также полученные и опубликованные данные многолетних исследований этих наблюдений, можно сформулировать следующие ключевые выводы.

1. Впервые в широком диапазоне сантиметровых длин волн (1.03–30.7 см) получены оценки уменьшения яркостных температур солнечного радиоизлучения полярной КД.

2. Впервые найдено распределение электронной концентрации по радиоизлучению открытой корональной области Солнца на расстояниях от $1-2 R_\odot$

в широком сантиметровом диапазоне длин волн (Golubchina and Korzhavin, 2014).

3. Впервые представленные распределения яркостных температур в диапазоне радиоволн 1.03–30.7 см при точности измерения антенных температур $T_a \sim 1$ К свидетельствуют о возможной нижней границе (меньше $1.2 R_\odot$) формирования солнечного ветра от исследуемых открытых областей Солнца.

БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаем благодарность анонимному рецензенту, чьи замечания позволили значительно улучшить статью

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания САО РАН, утвержденного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. I. Abramenko, L. A. Fisk, and V. B. Yurchishin, *Astrophys. J.* **641** (1), L65 (2006). DOI:10.1086/503716
2. S. R. Cranmer, *Living Reviews in Solar Physics* **6** (1), id. 3 (2009). DOI:10.12942/lrsp-2009-3
3. L. A. Fisk and N. A. Schwadron, *Astrophys. J.* **560** (1), 425 (2001). DOI:10.1086/321516
4. O. A. Golubchina, *Geomagnetism and Aeronomy* **65**, (7), 1050 (2025). DOI:10.31857/S00167940250709e2
5. O. A. Golubchina and G. S. Golubchin, *Astrofiz. Issled.: Izvestiya Spets. Astrofiz. Obs.* **14**, 125 (1981).
6. O. A. Golubchina and A. N. Korzhavin, *Astrophysical Bulletin* **68** (2), 219 (2013). DOI:10.1134/S1990341313020107
7. O. A. Golubchina and A. N. Korzhavin, *Geomagnetism and Aeronomy* **54** (8), 1039 (2014). DOI:10.1134/S0016793214080040
8. O. A. Golubchina, A. N. Korzhavin, and S. K. Tokhchukova, *Astrophysical Bulletin* **66** (4), 488 (2011). DOI:10.1134/S1990341311040110
9. J. M. Pasachoff, V. Rušin, M. Druckmüller, and M. Saniga, *Astrophys. J.* **665** (1), 824 (2007). DOI:10.1086/519680
10. J. M. Pasachoff, V. Rušin, M. Druckmüller, et al., *Astrophys. J.* **682** (1), 638 (2008). DOI:10.1086/588020

11. N. L. Reginald, J. S. Newmark, L. Rastaetter, and J. M. Davila, *Solar Physics* **260** (2), 347 (2009a). DOI:10.1007/s11207-009-9457-z
12. N. L. Reginald, O. C. St. Cyr, J. M. Davila, et al., *Solar Physics* **260** (2), 347 (2009b). DOI:10.1007/s11207-009-9457-z
13. V. V. Sobolev, *Course of Theoretical Astrophysics* (Nauka, Moscow, 1964)[in Russian].
14. Y. M. Wang, J. B. Biersteker, N. R. Sheeley J., et al., *Astrophys. J.* **660** (1), 882 (2007). DOI:10.1086/512480
15. V. V. Zheleznyakov, *Radio Emission of the Sun and Planets* (Nauka, Moscow, 1964)[in Russian].

Features of Centimeter Solar Radio Emission from RATAN-600 Observations of March 29, 2006 Solar Eclipse

O. A. Golubchina¹

¹Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

We present a survey of the main results of a study of radio emission sources in the northern polar (NP) region and the northwestern (NW) limb of the Sun, discovered during the observations of the maximum phase ($\Phi = 0.998$) of the March 29, 2006 solar eclipse in the microwave 1.03–30.7 cm range at the RATAN-600 radio telescope. During the data reduction, we used modeling of the Sun and the Moon radio emission under the assumption of circular symmetry. Estimates of the solar radio emission brightness temperature decrease in the region of the coronal hole (CH) in the studied range are obtained. The found brightness temperature and electron density distributions of the discovered NW region of the solar disk with distance from the center of its optical disk are discussed. The question of a possible lower boundary of solar wind formation from the studied NP region and NW limb of the Sun is considered.

Keywords: *astrometry and celestial mechanics: eclipses, Sun: radio radiation, Sun: corona, Sun: magnetic fields*