

НАБЛЮДЕНИЯ КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР НА СИБИРСКОМ РАДИОГЕЛИОГРАФЕ
OBSERVATIONS OF CORONAL HOLES WITH THE SIBERIAN RADIOHELIOGRAPH**А.Т. Алтынцев***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, altyntsev@iszf.irk.ru***М.В. Глоба***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, globa@iszf.irk.ru***Н.С. Мешалкина***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, nata@iszf.irk.ru***Р.А. Сыч***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, sych@iszf.irk.ru***A.T. Altyntsev***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, altyntsev@iszf.irk.ru***M.V. Globa***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, globa@iszf.irk.ru***N.S. Meshalkina***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, nata@iszf.irk.ru***R.A. Sych***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, sych@iszf.irk.ru*

Аннотация. Впервые выполнены многоволновые наблюдения корональной дыры (КД) с двумерным пространственным разрешением в диапазоне частот от 2.8 до 12 ГГц. На частотах ниже 6 ГГц средняя яркость по дыре в 1.5 раза меньше яркости спокойного Солнца. Распределение радиояркости по дыре неоднородно: отношение максимальных к минимальным яркостным температурам падает от нескольких раз на низких частотах до десятых долей на верхних принимаемых частотах. На частотах выше 6 ГГц контраст температур между КД и участками спокойного Солнца мал. Внутри КД наблюдаются яркие относительно спокойного Солнца компактные источники. В целом наблюдения КД с помощью SRG перспективны как для исследования природы КД, так и как средство регулярного мониторинга в прикладных задачах прогнозирования характеристик солнечного ветра.

Ключевые слова: Солнце, радиоизлучение, тормозное излучение, корональные дыры.

Abstract. Multi-wavelength observations of a coronal hole (CH) with two-dimensional spatial resolution have been made for the first time in the frequency range from 2.8 to 12 GHz. At frequencies below 6 GHz, the average brightness of the hole is 1.5 times lower than the brightness level of the quiet Sun. The distribution of radio brightness over the hole is inhomogeneous: the ratio of maximum to minimum brightness temperatures falls from several times at low frequencies to tenths of fractions at the upper received frequencies. At frequencies above 6 GHz, the temperature contrast between the CH and regions of the quiet Sun is small. Within the CH, there are compact sources that are bright relative to the quiet Sun. In general, observations of CHs with SRH are promising both for the research into the nature of CHs and for the applied problems of forecasting solar wind characteristics.

Keywords: Sun, radio emission, bremsstrahlung, coronal holes.

ВВЕДЕНИЕ

Корональные дыры (КД) — области пониженной яркости на изображениях солнечного диска в крайнем ультрафиолетовом (КУФ) или мягком рентгеновском излучении, соответствующие конфигурациям с открытыми силовыми линиями магнитного поля [Cranmer, 2009]. КД являются источниками высокоскоростных потоков солнечного ветра [Krieger et al., 1973; Nolte et al., 1976]. Данные об их площади и глубине депрессии яркости используются в прогнозах характеристик солнечного ветра в окрестности Земли [Vršnak et al., 2007; Obridko et al., 2009; Rotter et al., 2012, 2015; Reiss et al., 2016]. Депрессия излучения вызвана пониженными относительно спокойного Солнца температурой и плотностью плазмы в переходной области и наиболее контрастно выделяется в линиях 193 и 211 Å [Garton et al., 2018].

На высотах нижней короны КД могут проявляться как области депрессии яркостной температуры мик-

роволнового излучения. Первые радиоспектры КД были получены с помощью крупных радиотелескопов с диаграммами направленности несколько угловых минут [Papagiannis, Baker, 1982]. Было показано, что наибольший контраст, до уровня 0.5 относительно яркостной температуры спокойного Солнца T_{QS} , достигается на частотах 0.6–0.75 ГГц. В микроволновом диапазоне контраст уменьшается и наблюдается депрессия около $0.8T_{QS}$ на 3 ГГц. Позднее одномерные наблюдения КД с угловым разрешением около $1'$ были выполнены в широком диапазоне частот 1–15 ГГц на крупном радиотелескопе РАТАН-600 [Боровик и др., 1990; Дравских, Дравских, 2023]. Депрессия яркостной температуры наблюдалась на частотах ниже 6–7 ГГц. Анализ спектров показал, что депрессия в основном вызвана уменьшением в два раза плотности плазмы в короне над КД на высотах вплоть до $40 \cdot 10^3$ км. Температура плазмы в короне над КД может уменьшаться на 20 %.

Средние по корональной дыре яркостные температуры в зависимости от частоты

f , ГГц	2.8 3.0	3.2 3.4	3.6 3.8	4.0 4.2	4.4 5.0	5.8 6.2	6.6 7.0	7.4 7.8	8.2 8.6	9.0 9.4
T_{QS} , 10^3 К	27.2	23.9	21.5	19.7	17.8	15.1	14.1	13.3	12.7	12.2
T_{mean} , 10^3 К	18.6	16.5	15.2	17.2	14.8	15.3	14.8	14.0	13.0	13.0
T_{mean}/T_{QS}	0.7	0.7	0.7	0.87	0.83	1.01	1.05	1.05	1.02	1.06
T_{min} , 10^3 К	12	11	9	12.5	11	13	12	12	11	11
T_{max} , 10^3 К	30	20	18	21	18	19	17	16	15	14
T_{max}/T_{min}	2.5	1.8	2.0	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1.4	1.27

На частотах выше 10 ГГц, где вклад короны в излучение КД мал, контраст с окружающими участками спокойного Солнца практически незаметен.

Регулярные двумерные наблюдения КД в микроволнах с пространственным разрешением до 10–20'' начали проводиться в 90-х гг. на частотах 5.7 ГГц (ССРТ, [Grechnev et al., 2003]) и 17 ГГц [Nakajima et al., 1994]. На 5.7 ГГц в КД наблюдалась в основном депрессия яркостной температуры вплоть до $8 \cdot 10^3$ К при яркостной температуре спокойного Солнца $16 \cdot 10^3$ К. Области депрессии яркостной температуры на 5.7 ГГц были только в некоторых случаях близки по форме к КД, видимым в КУФ-излучении [Krissinel et al., 2000]. Во многих случаях внутри КД наблюдались компактные яркие источники с температурой до $22 \cdot 10^3$ К. На 17 ГГц контраст между КД и спокойным Солнцем не заметен, но внутри и на границах дыр выделялись во многих случаях источники повышенной радиояркости [Kosugi et al., 1986; Gopalswamy et al., 1999; Pohjolainen et al., 2000; Moran et al., 2001]. Рассматривались разные причины появления таких неоднородностей на 17 ГГц: 1) микровспышки в хромосферной сетке, приводящие к энергетическому выделению в основаниях КД [Gopalswamy et al., 1999]; 2) сгущения открытых силовых линий магнитного поля на уровне хромосферы, которым соответствует их повышенная расходимость в короне [Wang, Sheely, 1990].

Характеристики расположенных внутри КД микроволновых источников на частотах с малым (17 ГГц) и большим (5.7 ГГц) вкладом излучения на корональных высотах сравнивались в работе [Maksimov et al., 2006]. Было обнаружено, что мелкомасштабные неоднородности на этих частотах разносятся радиально, а их яркости антикоррелируют. Maksimov, Prosovetsky [2002] предположили, что антикорреляция яркостей объясняется разницей высот выделения волновой энергии на пути ее переноса из фотосферы в корону. Повышенное выделение энергии в нижних слоях магнитной трубки приводит к росту яркости на высоких частотах и, соответственно, к появлению депрессии выше, в короне. Возможно и обратное соотношение. Статистические исследования показали влияние ярких источников внутри КД на 17 ГГц на характеристики высокоскоростных потоков солнечного ветра [Akiyama et al., 2013].

Целью настоящей работы является анализ микроволновых наблюдений КД с помощью Сибирского радиогелиографа. Исследовались характеристики микроволновых структур в границах КД, наблюдавшейся в КУФ-излучении 25 апреля и 20 сентября 2023 г. в центральной части солнечного диска.

НАБЛЮДЕНИЯ

Для анализа микроволновых изображений использовались карты полного диска Солнца, полученные в течение минуты около 06:14 UT 25 апреля 2023 г. при тестовых наблюдениях на Сибирском радиогелиографе [Lesovoi et al., 2012; Алтынцев и др., 2020; <https://ckp-rf.ru/catalog/usu/4138190/>]. Радиокарты, построенные автоматически в рутинном режиме на 3.0 и 6.2 ГГц, и корреляционные кривые в интервале 00.00–10.00 UT доступны по адресу [<https://badary.iszf.irk.ru/srhDaily.php>]. Время накопления сигнала на этих изображениях 0.2 с.

Список частот для антенных решеток 3–6 ГГц и 6–12 ГГц приведен в верхней строке таблицы. Сигналы регистрировались независимо. В каждом диапазоне наблюдения проводились на 16 частотах со временем накопления на одной частоте 0.2 с. Длительность цикла последовательного перебора частот была менее 4 с. Методы амплитудной и фазовой калибровки при построении изображений основаны на избыточности антенной решетки и описаны в работе [Глоба, Лесовой, 2021]. Калибровка значений яркостных температур на изображениях производилась по участкам спокойного Солнца. Температуры композитного спектра (авторы благодарны Кочанову А.А., предоставившему композитный спектр микроволнового излучения спокойного Солнца), использованные при калибровке спокойного Солнца, получены в основном из измерений Zirin et al. [1991] и Боровика и др. [1992] и приведены во второй строке таблицы.

Слабоконтрастные области на изображениях с флуктуациями яркости выделялись двумя методами. В первом методе при построении радиокарт использовался код, разработанный М. Глобой. Корональные дыры исследовались по изображениям, полученным усреднением радиокарт на двух смежных частотах, причем на каждой частоте предварительно усреднялись 10 карт, зарегистрированных последовательно в течение минуты. Частоты наблюдений показаны в первой строке таблицы. Общее время накопления сигнала для карты сдвоенной частоты составляло около 4 с. Этот метод использовался при анализе наблюдений корональной дыры 25 апреля 2023 г. Во втором методе для построения изображений использовался код, разработанный С. Афиногентовым. Для увеличения времени накопления сигнала с антенн вначале усреднялись результаты измерений видностей пар антенн, зарегистрированных в десяти циклах перебора по частотам, а затем по ним строились изображения со временем накопления около 3 с на каждой частоте.

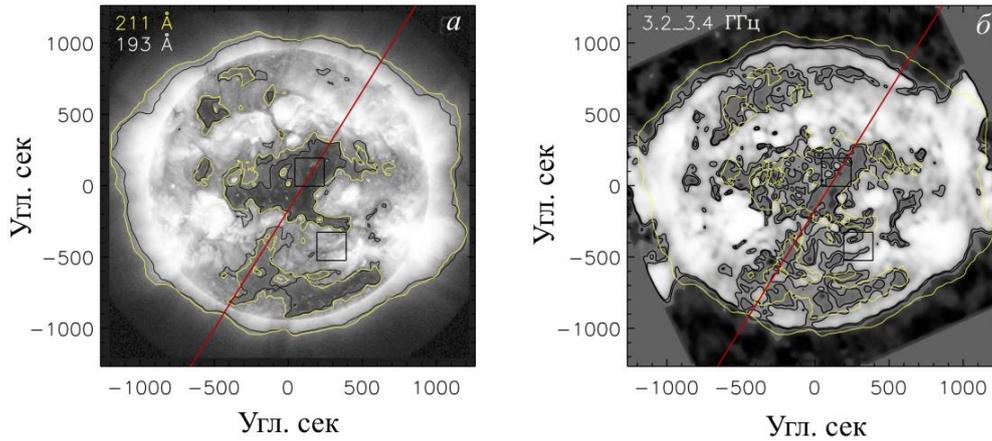


Рис. 1. Изображения корональной дыры 25 апреля 2023 г. Желтыми контурами показаны области депрессии на уровне половинной яркости в канале 211 Å. Изображения преобразованы с помощью процедуры эквализации гистограмм. Фон — изображение диска SDO/AIA в линии 211 Å (а). Черными контурами показаны депрессии яркости в линии 193 Å. Радиокарта, усредненная по частотам 3.2 и 3.4 ГГц (б). Черные контуры соответствуют уровням $0.7T_{QS}$ и $0.9T_{QS}$. Все изображения построены для времени 06:14 UT и сглажены окном 30''

На рис. 1 показаны изображения диска Солнца 25 апреля 2023 г. (06:14 UT) в КУФ (а) и микроволновом (б) излучении. Приведена радиокарта в диапазоне частот 3.2–3.4 ГГц, в котором область депрессии наиболее близка по форме к области в КУФ-излучении. Все изображения сглажены окном 30'' и подвергнуты эквализации гистограмм яркости с помощью IDL-процедуры `hist_equal.pro`. КУФ-изображения солнечного диска использовались для определения границ КД. Были выбраны КУФ-изображения в линиях 193 Å (фон и черные контуры) и 211 Å (желтые контуры), в которых КД проявляются наиболее контрастно [Garton et al., 2018]. Уровень контуров равен половине от средней яркости по диску Солнца. В этот день наблюдаются депрессии яркости в полярных областях и большая область депрессии в центре солнечного диска. Для выделения КД на диске Солнца мы использовали процедуры CHIMERA [Garton et al., 2018; <https://SolarMonitor.org>] и SPoCA [<https://suntoday.lmsal.com>; Verbeeck et al., 2014]. Заметим, что результаты разных процедур не всегда совпадают, тем более при определении границ КД. Область экваториальной КД, полученная с помощью CHIMERA, несколько уже области депрессии КУФ-излучения и вытянута вдоль красных прямых на рис. 1.

На рис. 2 приведены изображения КД (а, в) на самой низкой и самой высокой парах частот, представленных в таблице, вместе с КУФ-изображением (б) и магнитограммой продольного поля (з). Глубина депрессий спокойной температуры в КД относительно участка спокойного Солнца уменьшается с ростом частоты приема. Распределения яркости внутри КД на микроволновых изображениях неоднородны, видны крупномасштабные меридиональные ленты пониженной яркости, более узкие на высокой частоте. Некоторым лентам есть соответствие в распределении глубин депрессии в КУФ-излучении на 211 Å. Не наблюдается связи микроволновых неоднородностей со структурой продольного магнитного поля.

Для количественного описания мелкомасштабных неоднородностей микроволнового излучения внутри экваториальной КД рассмотрим свойства гистограмм яркостных температур в квадрате, вписанном в КД на рис. 1. Для абсолютной калибровки значений температур использовалась гистограмма в квадрате с центром [300, -400] угл. сек., расположенном в области спокойного Солнца. Максимуму попиксельной диаграммы этого квадрата присваивалось значение T_{QS} . Стороны обоих квадратов равны 200'' при размере пиксела 4.9''. Средние яркостные температуры T_{mean} КД приведены в таблице и отмечены звездочками на графиках на рис. 3. Бары показывают диапазон частот по оси абсцисс и максимальные отклонения по оси ординат. На частотах ниже 4 ГГц яркостная температура КД ниже температуры спокойного Солнца в 1.5 раза, затем контраст постепенно падает, а на частотах выше 5–6 ГГц средний уровень яркости КД немного превышает температуру спокойного Солнца.

Мелкомасштабное распределение радиояркости по КД также неоднородно, причем размах неоднородностей, т. е. отношение максимальных к минимальным яркостным температурам внутри квадрата, меняется от $T_{max}/T_{min}=2.5$ на нижней границе диапазона частот до десятков процентов на высоких частотах. Отметим, что минимальные яркостные температуры T_{min} достигают 9 ТК.

Для детального сравнения распределений яркостной температуры внутри КД удобно сравнивать профили радиояркости на разных частотах. На рис. 4, а–в приведены профили яркостной температуры вдоль сечения, показанного на рис. 1, 2 красной линией. На панели д показан разрез яркости КУФ-излучения в каналах SDO 193 и 211 Å, на котором вертикальными линиями показаны границы депрессии. На низких частотах, вплоть до 5.0 ГГц, в области КУФ-депрессии наблюдается депрессия яркости радиоизлучения, при этом профиль температуры не пологий, как в КУФ-излучении (з), а испытывает вариации от $9 \cdot 10^3$ до $25 \cdot 10^3$ К.

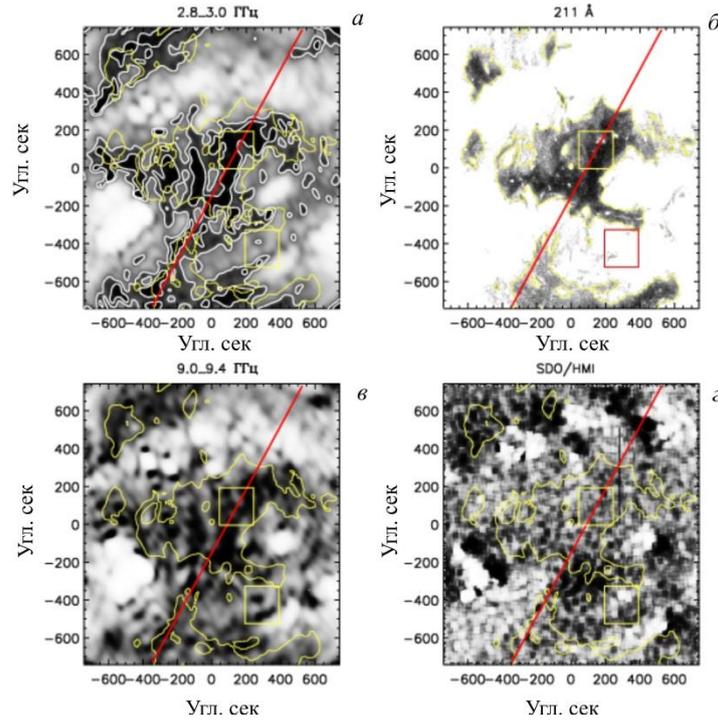


Рис. 2. Микроволновые карты КД на частотах с депрессией (а) и без (б). Фоновые изображения преобразованы эквализацией и сглаживанием окном $30''$. Белые контуры (панель а) соответствуют уровням $0.7T_{QS}$ и $0.9T_{QS}$. Желтые контуры — 0.5 от средней яркости КУФ-изображения SDO/AIA в линии 211 Å. Панель б — КУФ-изображение в канале 211 Å. Яркость обрезана сверху на уровне 0.6 от средней яркости по диску, чтобы выделить структуры внутри КД. Панель в — магнитограммы продольного поля, преобразованные эквализацией и сглаживанием окном $30''$. Красные линии показывают сечение для построения профилей яркостной температуры на рис. 3. Квадраты отмечают области, для которых проводился анализ гистограмм радиояркости

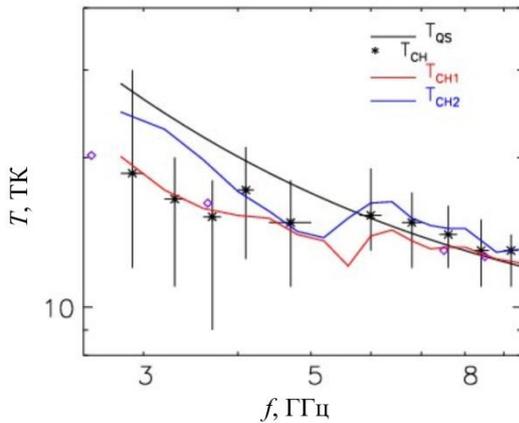


Рис. 3. Спектр радиоизлучения спокойного Солнца T_{QS} (сплошная линия) и яркостных температур, усредненных по КД. Звезды с барами показывают спектр КД 25 апреля 2023 г. Бары показывают T_{max} и T_{min} внутри квадрата КД. Сиреневые ромбы показывают измерения на РАТАН-600 [Боровик и др., 1990]. Красные и синие кривые — средние яркостные температуры в КД, зарегистрированные 20 сентября 2023 г.

Видно, что значимая поляризация в границах КД наблюдается на нижних частотах (рис. 4, а, б). На кривой поляризации излучения на 2.8–3.0 ГГц (панель а) наблюдаются значительные флуктуации с амплитудой до 20 % и с изменением знака. Флуктуации на панели б значительно меньше, и они не коррелируют с кривой на панели а. На высоких частотах (см. панель в) поток поляризованного излучения мал.

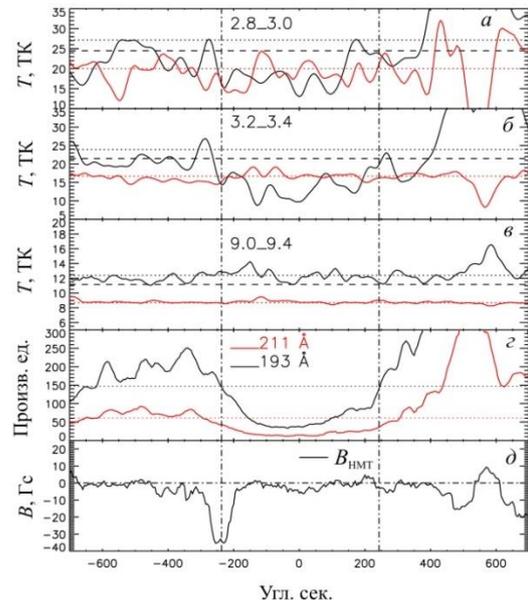


Рис. 4. Профили яркостной температуры в интенсивности (R+L, сплошная линия) (а–в), построенные вдоль сечений солнечного диска, показанных на рис. 1, 2. Черные пунктирные, штриховые и красные пунктирные линии — уровни спокойного Солнца $1T_{QS}$, $0.9T_{QS}$, $0.7T_{QS}$. Панель в — профили яркости в КУФ-линиях 211 и 193 Å. Вертикальные штрихпунктирные линии на всех панелях — границы КД, определенные по КУФ-излучению в канале 193 Å, черные и красные пунктирные линии соответствуют половине яркости в соответствующем канале. Все профили сглажены окном $30''$. Панель д — профиль магнитограммы SDO/HMI

Разрез магнитограммы (рис. 4, *д*) показывает, что магнитное поле вдоль разреза имеет преимущественно южное направление, а его амплитуда меняется вдоль сечения с масштабом около 30", характерным для хромосферной супергрануляции. Величина компоненты фотосферного магнитного поля по лучу зрения в основном не превышает нескольких гаусс.

На рис. 5 приведены изображения для 20 сентября 2023 г., построенные методом Анфиногентова с усреднением функций видности. Карты и корреляционные кривые, полученные в рутинном режиме, приведены по адресу [<https://badary.iszf.irk.ru/srhDaily.php>]. Для 01:00–01:28 UT были получены изображения с шагом одна минута на 20 частотах в диапазоне 2.8–11.6 ГГц. Для увеличения отношения сигнал/шум и соответственно видимости депрессий на каждой частоте применялось их усреднение. Из последовательности карт в диапазоне 2.8–11.6 ГГц видно, что характер их изменений с частотой подобен рассмотренному выше для карт Солнца 25 апреля 2023 г. Глубина депрессии уменьшается с частотой, и контраст со спокойным Солнцем заметен на частотах ниже 7.2 ГГц.

Проведем сравнение микроволновых карт с распределением по диску КУФ-излучения на волне 193 Å и магнитограммой (рис. 6). На КУФ-картах мы видим ряд депрессий, расположенных в окрестности центрального меридиана. Можно выделить два типа депрессий. Первый тип связан с корональными дырами. Второй тип соответствует волокнам, холодное вещество которых экранирует подстилающую поверхность Солнца. На рис. 6, *а* депрессии видны как темные области с пониженной относительно среднего уровня КУФ-излучения солнечного диска интенсивностью. Для разделения наблюдаемых депрессий по типам мы использовали магнитограмму SDO/AIA. Наложение контуров депрессий на магнитограмму (рис. 6, *б*) показывает, что структуры разных типов различаются по пространственному положению относительно нейтральной линии крупномасштабного магнитного поля: контуры КД охватывают области продольного магнитного поля одного знака, а волокна находятся вблизи или вдоль нейтральных линий общего магнитного поля Солнца. Мы видим, что одновременно существуют области как вдоль или под углом к нейтральным линиям (филаменты), так и полностью находящиеся в униполярных областях (корональные дыры). Этот критерий пространственного расположения депрессий относительно магнитного поля является ключевым в поиске КД с использованием CHIMERA.

ОБСУЖДЕНИЕ

Радиокарты СРГ позволяют уверенно регистрировать депрессии радиояркости, связанные с КД. По форме и размеру области депрессии в КУФ-излучении наиболее близки к областям депрессии в микроволновом излучении на частотах около 3–4 ГГц. Ежедневные наблюдения на СРГ можно использовать, аналогично внеатмосферным КУФ-изображениям, для выделения КД на диске Солнца. Контраст де-

прессий на частотах около 3 ГГц достаточен для использования методов машинного обучения, подобных рассмотренному в статье [Шаронов, Тлатов, 2018].

Тестовые наблюдения на Сибирском радиогелиографе подтвердили результаты наблюдений КД, полученные на основе многоволновых одномерных сканов РАТАН-600 и двумерных карт ССРТ (5.7 ГГц) и радиогелиографа Нобеяма (17 ГГц).

На рис. 3 сиреневые ромбы показывают усредненные для 4 КД результаты измерений радиоспектра с помощью РАТАН-600 во время минимума солнечной активности 1984–1986 гг. [Боровик и др., 1990]. Согласно [Боровик и др., 1990] частота, при превышении которой исчезает контраст между яркостными температурами КД и спокойного Солнца, составляет 7.5 ГГц. Отметим, что депрессии, регистрируемые РАТАН-600 и СРГ, близки по глубине. Для полярной КД, наблюдавшейся во время солнечного затмения 29 марта 2006 г., Golubchina [2022] оценила частоту, выше которой яркостные температуры КД и спокойного Солнца сравниваются, в 5 ГГц.

В работе [Дравских, Дравских, 2023] обсуждаются измерения спектров КД с помощью РАТАН-600. В этой работе, выполненной по данным наблюдений 22 КД во время спада 24-го цикла активности, принимается средняя частота исчезновения контраста 10 ГГц. К сожалению, в работе не обсуждается точность выделения излучения КД на одномерных сканах диска активного Солнца. Преимуществом двумерных наблюдений на СРГ является возможность выделения КД в периоды высокой солнечной активности, когда на солнечном диске много активных областей. Для трех КД, наблюдавшихся во время тестовых испытаний СРГ, средняя частота исчезновения контраста находится в окрестности 6 ГГц (см. рис. 3).

Из рис. 2 следует, что структуры пониженной яркости с масштабами более 100" прослеживаются в микроволновом диапазоне от 2.8 до 10 ГГц. Эти структуры не имеют явного соответствия с распределением продольной компоненты магнитного поля. В КУФ-излучении неоднородности практически не наблюдаются (см. рис. 4). Попиксельный анализ яркостной температуры в участке КД показывает также наличие мелкомасштабных (несколько угловых секунд) неоднородностей. Размах яркости в пикселях на частоте 2.8 ГГц достигает $T_{\max}/T_{\min}=2.5$, а с ростом частоты падает до 1.3 на частотах порядка 10 ГГц.

Микроволновое излучение спокойного Солнца и КД генерируется тормозным механизмом и складывается в первом приближении из излучения двух слоев: оптически толстой хромосферы и оптически тонкой короны в интервале высот до 40 тыс. км [Bogod, Grebinskij, 1997]. Депрессии проявляются на низких частотах, на которых велик вклад коронального слоя, и объясняются примерно в 1.5 раза меньшими плотностью и температурой плазмы в короне над КД относительно спокойного Солнца [Боровик и др., 1999].

Интересно обсудить уникальные результаты Боровик и др. [1999] по оценке магнитного поля в короне над КД. Высокая чувствительность РАТАН-600 позволила измерить степень поляризации на частоте

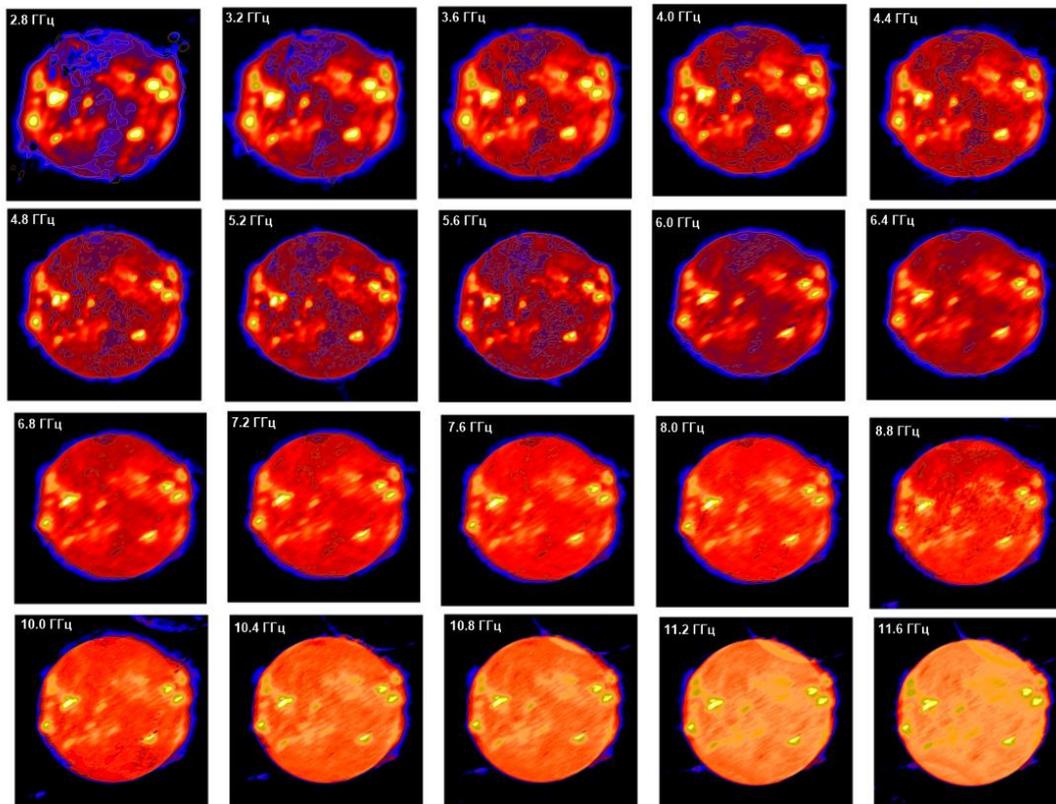


Рис. 5. Изображения полного диска Солнца, полученные 20 сентября 2023 г. в диапазоне 2.8–11.6 ГГц

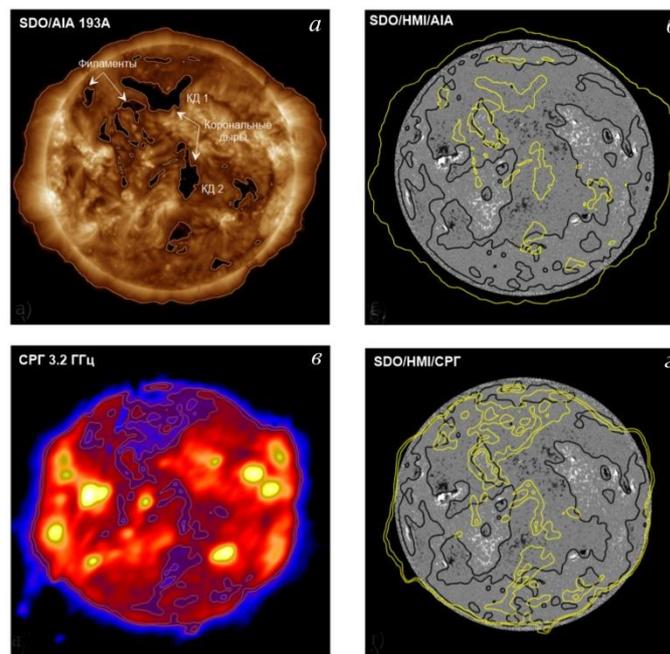


Рис. 6. Панель *а* — изображение солнечного диска в КУФ-канале 193 \AA (*а*), полученное SDO/AIA 20.09.23 (01:00 UT); стрелками указаны выделенные депрессии излучения. Панель *б* — магнитограмма: черные контуры — глобальная нейтральная линия продольного магнитного поля; желтые — выделенные депрессии на 193 \AA . Панель *в* — радиокарта на частоте 3.2 ГГц ; контуры показывают уровни яркостной температуры $0.7T_{Q_S}$, $0.9T_{Q_S}$. Панель *г* — магнитограмма с наложением желтых контуров депрессий в микроволновом излучении; черные контуры — глобальная нейтральная линия продольного магнитного поля. Области депрессии на микроволновой карте солнечного диска также вытянуты примерно вдоль центрального меридиана. На уровне $0.9T_{Q_S}$ они обширнее областей половинной яркости КУФ-излучения, а глубокие депрессии $0.7T_{Q_S}$ более компактные. Изменения яркостных температур в области КД с частотой показаны на рис. 3 красной кривой для приполярной дыры КД 1 и синей — для экваториальной дыры КД 2 (*а*). Графики показывают, что характер зависимости средних яркостных температур от частоты для всех исследуемых корональных дыр одинаков. На низких частотах яркость КД значительно ниже уровня спокойного Солнца и сравнивается с ним на частотах приема выше $6\text{--}7 \text{ ГГц}$.

около 3 ГГц — 0.2 %. В случае тормозного механизма излучения можно рассчитать компоненту магнитного поля вдоль луча зрения [Gelfreikh, 2004]:

$$B = 107 \frac{P}{n\lambda},$$

где B — магнитное поле [Гс]; P — степень поляризации [%]; n — степенной показатель микроволнового спектра; λ — длина волны излучения [см]. Величина $n \approx 0.9$ определяется по спектру излучения КД. Таким образом, для частоты 3 ГГц магнитное поле вдоль луча зрения составляет 2–3 Гс.

В событии 25 апреля 2023 г. наблюдаются флуктуации степени поляризации внутри КД с амплитудой до 20 % (см. рис. 4). Средняя степень поляризации внутри КД также значительна: от 3.7 % на 2.8–3.0 ГГц до 0.95 % на 3.2–3.4 ГГц. Соответственно, усредненные оценки магнитного поля для этих частот неожиданно велики — 16.8 и 4.9 Гс. Близкая оценка степени поляризации $P \approx 1.5$ % получена на низкой частоте для КД2 20 сентября 2024 г. Однако в этом случае в КД небольшой площади поляризация не исчезает с ростом частоты, а в среднем растет. Можно сделать вывод, что в обсуждаемых тестовых наблюдениях высокий уровень шумовых флуктуаций и, возможно, следы боковых лепестков не позволили достичь минимального уровня измерений степени поляризации с помощью РАТАН-600. Для решения этой задачи необходимы наблюдения обширной КД, проведенные с низким уровнем боковых лепестков и временем накопления сигнала несколько минут.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тестовые наблюдения корональных дыр с помощью двух антенных решеток в диапазонах 3–6 и 6–12 ГГц показали высокий диагностический потенциал Сибирского радиогелиографа. Спектральные наблюдения на СРГ позволят получить уникальную информацию о динамике и структуре солнечной атмосферы над КД с уровня хромосферы до нижней короны, а также о физической природе неоднородностей внутри КД, включая особенности распределения магнитного поля.

Перспективно использование регулярного картографирования солнечного диска в прикладных задачах, связанных с прогнозированием вариаций солнечного ветра. Наблюдения на СРГ могут обеспечить получение основных параметров КД, используемых в прогнозировании (положение и форма областей депрессии, глубина депрессии, всплещная активность на границах КД, неоднородности яркости внутри КД), которые в настоящее время получают на основе внеатмосферных наблюдений КУФ-излучения.

Авторы благодарны команде РАО ИСЗФ за предоставленные данные СРГ.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 22-22-00019. Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках базового финансирования программы П.16.3.2 «Не-

стационарные и волновые процессы в солнечной атмосфере». Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» [<http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алтынцев А.Т., Лесовой С.В., Глоба М.В. и др. Многоволновый Сибирский радиогелиограф. *Солнечно-земная физика*. 2020. Т. 6, № 2. С. 37–50. DOI: [10.12737/szf-62202003](https://doi.org/10.12737/szf-62202003).
- Боровик В.Н., Курбанов М.С., Лившиц М.А. Рябов Б.И. Корональные дыры на фоне спокойного Солнца: Анализ наблюдений на РАТАН-600 в диапазоне 2–32 см. *Астрономический журнал*. 1990. Т. 67. С. 10–38.
- Боровик В.Н., Курбанов М.С., Макаров В.В. Распределение яркости спокойного Солнца по диску в диапазоне 2–32 см. *Астрономический журнал*. 1992. Т. 69, № 6. С. 1288–1302.
- Боровик В.Н., Медарь В.Г., Коржавин А.Н. Первые измерения магнитного поля в корональной дыре по радионаблюдениям Солнца на РАТАН-600. *Письма в АЖ*. 1999. Т. 25, № 4. С. 299–307.
- Глоба М.В., Лесовой С.В. Калибровка амплитуд коэффициентов передачи антенн Сибирского радиогелиографа с использованием избыточности. *Солнечно-земная физика*. 2021. Т. 7, № 4. С. 104–110. DOI: [10.12737/szf-74202111](https://doi.org/10.12737/szf-74202111).
- Дравских А.Ф., Дравских Ю.А. Адиабатный спектр радиоизлучения корональных дыр Солнца. *Астрономический журнал*. 2023. Т. 100, № 5. С. 472–478. DOI: [10.31857/S0004629923050031](https://doi.org/10.31857/S0004629923050031).
- Akiyama S., Gopalswamy N., Yashiro S., Mäkelä P. A study of coronal holes observed by SOHO/EIT and the Nobeyama Radioheliograph. *Publications of the Astronomical Society of Japan*. 2013. Vol. 65, S15. DOI: [10.1093/pasj/65.sp1.S15](https://doi.org/10.1093/pasj/65.sp1.S15).
- Bogod V.M., Grebinkij A.S. Large-scale structure of the atmosphere of the quiet Sun, coronal holes, and plages as deduced by tomography study. *Solar Phys*. 1997. Vol. 176, iss. 1. P. 67–86. DOI: [10.1023/A:1004929418335](https://doi.org/10.1023/A:1004929418335).
- Cranmer S.R. Coronal holes. *Living Reviews in Solar Physics*. 2009. Vol. 6, iss. 1-3. 66 p. DOI: [10.12942/lrsp-2009-3](https://doi.org/10.12942/lrsp-2009-3).
- Garton T.M., Gallagher P.T., Murray S.A. Expansion of High-speed Solar Wind Streams from Coronal Holes through the Inner Heliosphere. *Journal of Space Weather and Space Climate*. 2018. Vol. 8, A02. 12 p. DOI: [10.1051/swsc/2017039](https://doi.org/10.1051/swsc/2017039).
- Gelfreikh G.B. Coronal Magnetic Field Measurements Through Bremsstrahlung Emission. *Solar and Space Weather Radiophysics*. 2004. P. 115. DOI: [10.1007/1-4020-2814-8_6](https://doi.org/10.1007/1-4020-2814-8_6).
- Golubchina O.A. Investigation of the polar coronal hole in the Sun with RATAN-600 in the centimeter radio range. *POS. Vol. 425: The Multifaceted Universe: Theory and Observations – 2022 (MUTO2022)*. 2022. 063. URL: <https://pos.sissa.it/425/063/pdf> (дата обращения 19 мая 2024 г.).
- Gopalswamy N., Shibasaki K., Thompson B.J., et al. Microwave enhancement and variability in the elephant's trunk coronal hole: Comparison with SOHO observations. *J. Geophys. Res.* 1999. Vol. 104. P. 9767–9780. DOI: [10.1029/1998JA900168](https://doi.org/10.1029/1998JA900168).
- Grechnev V.V., Lesovoi S.V., Smolkov G.Ya., et al. The Siberian Solar Radio Telescope: the current state of the instrument, observations, and data. *Solar Phys*. 2003. Vol. 216. P. 239–272. DOI: [10.1023/A:1026153410061](https://doi.org/10.1023/A:1026153410061).
- Illarionov E.A., Tlatov A.G. Segmentation of coronal holes in solar disc images with a convolutional neural network. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2018. Vol. 481, iss. 4. P. 5014–5021. DOI: [10.1093/mnras/sty2628](https://doi.org/10.1093/mnras/sty2628).
- Kosugi T., Ishiguro M., Shibasaki K. Polar-cap and coronal-hole-associated brightenings of the sun at millimeter wavelengths. *Publications of the Astronomical Society of Japan*. 1986. Vol. 38. P. 1–11.

Krieger A.S., Timothy A.F., Roelof E.C. A coronal hole and its identification as the source of a high velocity solar wind stream. *Solar Phys.* 1973. Vol. 29. P. 505–525. DOI: [10.1007/BF00150828](https://doi.org/10.1007/BF00150828).

Krissinel B.B., Kuznetsova S.M., Maksimov V.P., et al. Some features of manifestations of coronal holes in microwave emission. 2000. *Publications of the Astronomical Society of Japan.* 2000. Vol. 52, iss. 5. P. 909–917. DOI: [10.1093/pasj/52.5.909](https://doi.org/10.1093/pasj/52.5.909).

Lesovoi S.V., Altyntsev A.T., Ivanov E.F., Gubin A.V. The Multifrequency Siberian Radioheliograph. *Solar Phys.* 2012. Vol. 280. P. 651–661. DOI: [10.1007/s11207-012-0008-7](https://doi.org/10.1007/s11207-012-0008-7).

Maksimov V.P., Prosovetsky D.V. Coronal heating in the coronal holes regions. *Solar Variability: From Core to outer Frontiers. The 10th European Solar Physics Meeting, 9–14 September 2002, Prague, Czech Republic.* ESA SP-506, Vol. 2. Noordwijk: ESA Publications Division, 2002. P. 689–692.

Maksimov V.P., Prosovetsky D.V., Grechnev V.V., et al. On the relation of brightness temperatures in coronal holes at 5.7 and 17 GHz. *Publications of the Astronomical Society of Japan.* 2006. Vol. 58. P. 1–10. DOI: [10.1093/pasj/58.1.1](https://doi.org/10.1093/pasj/58.1.1).

Moran T., Gopalswamy N., Dammasch I.E., Wilhelm K. A multi-wavelength study of solar coronal-hole regions showing radio enhancements. *Astron. and Astrophys.* 2001. Vol. 378. P. 1037–1045. DOI: [10.1051/0004-6361:20010569](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20010569).

Nakajima H., Nishio M., Enome S., et al. The Nobeyama Radioheliograph. *Proc. IEEE.* 1994. Vol. 82. P. 705–713.

Nolte J.T., Krieger A.S., Timothy A.F., et al. Coronal holes as sources of solar wind. *Solar Phys.* 1976. Vol. 46. P. 303–322. DOI: [10.1007/BF00149859](https://doi.org/10.1007/BF00149859).

Obridko V.N., Shelting B.D., Livshits I.M., Asgarov A.B. Contrast of Coronal Holes and Parameters of Associated Solar Wind Streams. *Solar Phys.* 2009. Vol. 260. P. 191–206. DOI: [10.1007/s11207-009-9435-5](https://doi.org/10.1007/s11207-009-9435-5).

Papagiannis M.D., Baker K.B. Determination and analysis of coronal hole radio spectra. *Solar Phys.* 1982. Vol. 79. P. 365–374. DOI: [10.1007/BF00146252](https://doi.org/10.1007/BF00146252).

Pohjolainen S., Portier-Fozzani F., Ragaigine D. Comparison of 87 GHz solar polar structures with EUV and soft X-ray emission. *American Astronomical Society.* 2000. Vol. 143. P. 227–263. DOI: [10.1051/aas:2000179](https://doi.org/10.1051/aas:2000179).

Reiss M.A., Temmer M., Veronig A.M., et al. Verification of high-speed solar wind stream forecasts using operational solar wind models. *Space Weather.* 2016. Vol. 14. P. 495–511. DOI: [10.1002/2016SW001390](https://doi.org/10.1002/2016SW001390).

Rotter T., Veronig A.M., Temmer M., Vršnak B. Relation between coronal hole areas on the sun and the solar wind parameters at 1 AU. *Solar Phys.* 2012. Vol. 281. P. 793–813. DOI: [10.1007/s11207-012-0101-y](https://doi.org/10.1007/s11207-012-0101-y).

Rotter T., Veronig A.M., Temmer M., Vršnak B. Real-time solar wind prediction based on SDO/AIA coronal hole data. *Solar Phys.* 2015. Vol. 290. P. 1355–1370. DOI: [10.1007/s11207-015-0680-5](https://doi.org/10.1007/s11207-015-0680-5).

Verbeeck C., Delouille V., Mampaey B., De Visscher R. The SPoCA-suite: Software for extraction, characterization, and tracking of active regions and coronal holes on EUV images. *Astron. Astrophys.* 2014. Vol. 561, A29. 16 p. DOI: [10.1051/0004-6361/201321243](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201321243).

Vršnak B., Temmer M., Veronig A.M. Coronal holes and solar wind high-speed streams: I. Forecasting the solar wind parameters. *Solar Phys.* 2007. Vol. 240. P. 315–330. DOI: [10.1007/s11207-007-0285-8](https://doi.org/10.1007/s11207-007-0285-8).

Zirin H., Baumert B.M., Hurford G.J. The microwave brightness temperature spectrum of the quiet Sun. *Astrophys. J.* 1991. Vol. 370. P. 779. DOI: [10.1086/169861](https://doi.org/10.1086/169861).

Wang Y.-M., Sheeley N.R., Jr. Solar wind speed and coronal flux-tube expansion. *Astrophys. J.* 1990. Vol. 355. P. 726. DOI: [10.1086/168805](https://doi.org/10.1086/168805).

URL: <https://badary.iszf.irk.ru/srhDaily.php> (дата обращения 19 мая 2024 г.).

URL: <https://SolarMonitor.org> (дата обращения 19 мая 2024 г.).

URL: <https://suntoday.lmsal.com> (дата обращения 19 мая 2024 г.).

URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/> (дата обращения 19 мая 2024 г.).

URL: <https://ckp-rf.ru/catalog/usu/4138190/> (дата обращения 19 мая 2024 г.).

Статья подготовлена по материалам Девятнадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 5–9 февраля 2024 г., ИКИ РАН, Москва.

Как цитировать эту статью:

Алтынцев А.Т., Глоба М.В., Мешалкина Н.С., Сыч Р.А. Наблюдения корональных дыр на Сибирском радиогелиографе. *Солнечно-земная физика.* 2024. Т. 10, № 3. С. 5–12. DOI: [10.12737/szf-103202401](https://doi.org/10.12737/szf-103202401).