

АДИАБАТНЫЙ СПЕКТР РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР СОЛНЦА

© 2023 г. А. Ф. Дравских^{1,*}, Ю. А. Дравских¹

¹ Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Санкт-Петербургский филиал, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: dedalfed@mail.ru

Поступила в редакцию 07.11.2022 г.

После доработки 06.02.2023 г.

Принята к публикации 06.03.2023 г.

Корональные дыры на Солнце наблюдаются на отдельных частотах достаточно давно в диапазоне волн от радио до рентгена. Наблюдения в широком диапазоне радиочастот проводятся на радиотелескопе РАТАН-600. Анализ многолетних спектральных наблюдений радиотелескопа РАТАН-600 показал, что спектр излучения корональных дыр радикально отличается от спектра активных образований над пятнами, но, заметно отличаясь от спектра спокойного Солнца, имеет с ним и сходство. Установлено: радиоизлучение корональных дыр имеет адиабатный спектр и не содержит заметного когерентного излучения, т.е. рекомбинационных радиолиний и линий тонкой структуры водорода и других элементов.

Ключевые слова: солнечное радиоизлучение, спектр радиоизлучения спокойного Солнца, спектр радиоизлучения активных образований над солнечными пятнами, адиабатный спектр радиоизлучения корональных дыр, сравнение спектров солнечных радиолиний и линий тонкой структуры образований

DOI: 10.31857/S0004629923050031, EDN: YWCOFP

1. ВВЕДЕНИЕ

Корональные дыры (КД) — области в короне Солнца, видимые как темные образования. Они отличаются от окружающих областей более низкой температурой и очень низкой плотностью плазмы. Магнитное поле КД достаточно слабое, а линии магнитного поля направлены преимущественно вдоль радиуса Солнца и простираются далеко в межпланетное пространство. С КД связаны потоки плазмы, называемые солнечным ветром. Скорость истечения плазмы иногда достигает 700 километров в секунду. Если КД расположена в экваториальной зоне Солнца, то солнечный ветер попадает в область расположения Земли и вызывает геомагнитные возмущения. Корональные дыры наблюдались и были впервые описаны [1] в 1956 г. В настоящее время корональные дыры наблюдаются во всех диапазонах частот, от радио до рентгена. Подробный обзор исследований, связанных с КД, приведен в [2]. В нем показано, что поиски физических механизмов, позволяющих объяснить феномен КД и их свойства, пока не привели к созданию необходимого комплекта теоретических моделей явления.

Настоящая работа связана со спектральными свойствами КД в радиодиапазоне. Радионаблюдения КД проводятся в течение многих лет на разных волнах на различных антеннах. Радиоте-

лескоп РАТАН-600 (РТ) проводит практически ежедневные наблюдения Солнца. Спектральный комплекс радиотелескопа обладает большим диапазоном анализируемого спектра (3–18 ГГц, 10–1.7 см) но, к сожалению, имеет не высокое спектральное разрешение — 84 канала шириной ~100 МГц, расставленных через 187.5 МГц [3]. РТ имеет диаграмму направленности ножевой формы (28'' × 20' на волне 3 см). Наблюдения проводятся в пассажном режиме. Архив результатов наблюдений находится в открытом доступе на сайте <http://www.spbf.sao.ru/prognoz/>. За время наблюдений РТ, с июня 2016 до апреля 2022 г., мы обнаружили 22 КД, расположенных в экваториальной зоне Солнца и не далеко от нулевого меридиана Солнца ($\pm 400''$).

В работе [4] J.P. Wild предсказал возможность наблюдения в спектре спокойного Солнца линии тонкой структуры $2^2P_{3/2}-2^2S_{1/2}$ второго квантового уровня водорода ($n = 2$) на частоте 9845 МГц (3.05 см). Впервые эта линия была обнаружена в работе [5]. Спектральные исследования на РТ показали [6], что спокойное Солнце (СС) и активные образования над пятнами (АО) содержат в своих спектрах эту радиолинию. В работе [7] в спектрах АО обнаружены признаки спектральных линий тонкой структуры водорода для $n = 3$ на частотах 2917 и 3237 МГц (10.28 и 9.27 см). В [8],

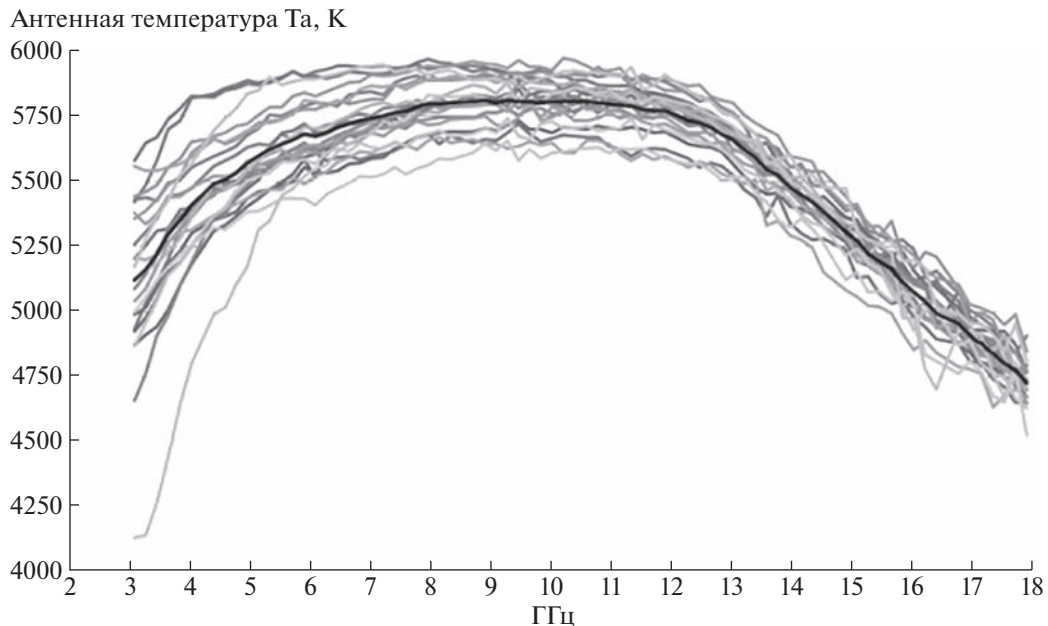


Рис. 1. Осреднение спектров 22-х корональных дыр. Средний спектр показан черным.

путем сравнения неоднородностей (не гладкости) спектров СС и АО показано, что в спектрах АО с большой вероятностью доступно наблюдению множество рекомбинационных радиолиний водорода и других элементов. В связи с такими результатами появился соблазн сравнить спектры корональных дыр (КД) со спектрами СС и АО, что и проделано в этой работе.

2. СПЕКТРЫ КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР, СПОКОЙНОГО СОЛНЦА И АКТИВНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ НАД ПЯТНАМИ

Для выяснения присущих КД спектральных свойств в диапазоне частот радиоспектрографа РАТАН-600 рассмотрим спектральные характеристики среднего спектра КД, полученного из спектров 22-х КД, наблюдавшихся на РТ. Определение области КД производилось по данным системы CHIMERA, действующей на спутнике Solar Dynamics Observatory (SDO) в диапазоне экстремального ультрафиолета EUV.

На рис. 1 показана совокупность осредняемых спектров 22-х КД.

Различие положений индивидуальных спектров по оси T_a объясняется диаграммными эффектами, связанными с различием размеров КД и различием их положений относительно центра диска Солнца, а также — наличием в ножевой диаграмме антенны не идеально спокойного Солнца. Большое различие в величине завала спектра на нижних частотах можно объяснить различием скоростей извержения плазмы (сол-

нечного ветра) из КД и различиями конфигурации магнитного поля КД.

На рис. 2 приведены средние спектры, полученные на радиотелескопе РАТАН-600. Спектры СС и АО взяты из работы [8], спектр КД получен в настоящей работе. Эти спектры являются средними, соответственно, из 30, 30 и 22 одиночных спектров.

Спектр КД изображен без указателей спектральных каналов. Спектры достаточно сложные. Форма спектров определяется механизмами излучения этих объектов. Однако, поскольку эти спектры получены на радиотелескопе РАТАН-600, обладающем диаграммой направленности ножевого типа, то их форма определяется также диаграммными эффектами, связанными с различиями размеров объектов.

В арсенале физики плазмы существует 5 механизмов генерации электромагнитных волн отдельными частицами [9]:

- 1) тормозное излучение при близких соударениях заряженных частиц,
- 2) магнитотормозное излучение при ускоренном движении частиц в магнитном поле,
- 3) черенковское излучение при движении заряженных частиц со скоростью, превышающей фазовую скорость волн в среде,
- 4) переходное излучение при движении в неоднородной среде,
- 5) излучение при атомных и молекулярных процессах (т.е. при переходах свободных электронов на дискретные энергетические уровни и при

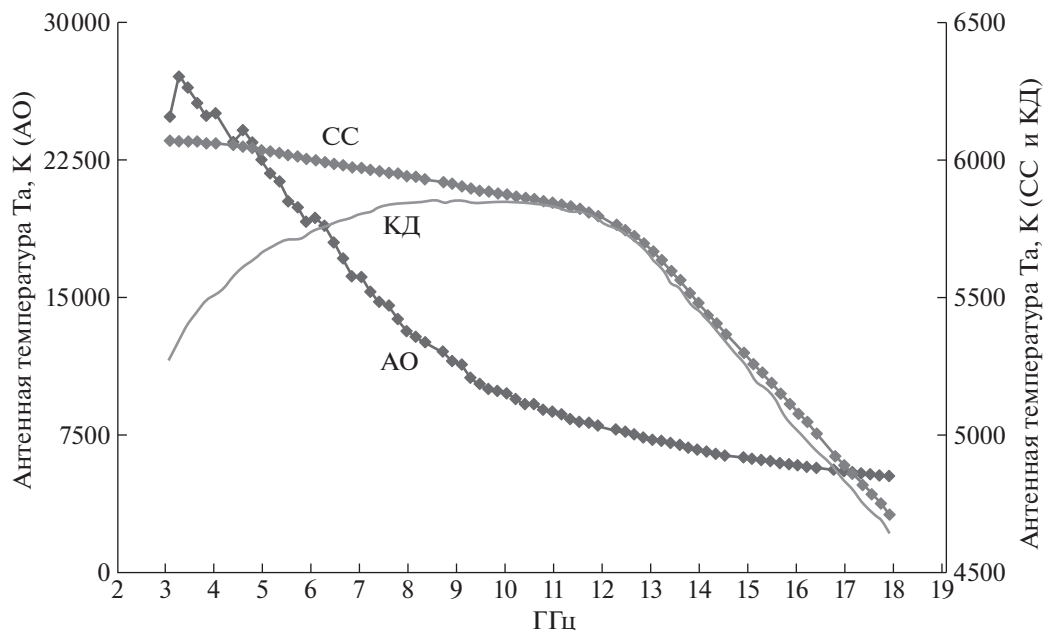


Рис. 2. Средние спектры спокойного Солнца (СС), активных образований над пятнами (АО) и корональных дыр (КД).

переходах между дискретными уровнями в атомах и молекулах).

Согласно [9] радиоизлучение СС имеет тормозной механизм генерации при тепловом характере излучения с распределением частиц, близком к равновесному (максвелловскому).

Спектры и антенные температуры КД и СС практически совпадают в диапазоне высоких частот, от 10 ГГц и выше. Следует полагать, что и механизмы генерации излучения СС и КД совпадают. Совпадение спектров и антенных температур СС и КД в области частот от 10 ГГц и выше означает, что КД на этих частотах практически не видны на фоне СС. Но почему спектр КД на низких частотах сильно заваливается?

Мы считаем, что причиной такого необычного спектра КД является адиабатический (или адиабатный) процесс (АП). Суть АП состоит в том, что изолированный от внешнего влияния газ при сжатии нагревается. Этот процесс обратим, т.е. при расширении газа он охлаждается [10]. Примеры АП в быту: нагрев автомобильных или велосипедных шин и самого насоса при накачивании шин, при работе бытовых холодильников присутствуют оба альтернативных явления (нагрев и охлаждение). Адиабатический процесс присущ и солнечной плазме. С помощью АП производится нагрев плазмы в токамаках (реакторах управляемого термоядерного синтеза).

Каким образом АП влияет на спектр КД? На рис. 3 показана схема возникновения падающего спектра КД на низких частотах под влиянием адиабатического процесса.

Известно [4, 11], что излучение исходит преимущественно с того уровня, где максимальное поглощение. Кроме того известно, что поглощение в плазме растет с понижением частоты излучения. То есть, низкие частоты излучаются с более близких к наблюдателю слоев, чем высокие частоты.

В области КД силовые линии магнитного поля образуют сильно расходящуюся конфигурацию [12]. Поток плазмы, следуя вдоль магнитного поля, также быстро расширяется, и его плотность и давление падают, что приводит к снижению температуры (эффект АП) более близких к наблюдателю слоев плазмы в большей степени, чем дальних слоев. Но более низкочастотное излучение идет из более близких к наблюдателю слоев плазмы по сравнению с высокочастотным излучением. Иными словами, градиент роста температуры плазмы направлен к Солнцу, а локальный градиент излучательной способности плазмы на низких частотах направлен от Солнца. Это и создает наблюдаемый нами падающий на низких частотах спектр КД.

Из области 2 излучаются более низкие частоты, а температура плазмы в этой области намного меньше 6000 К из-за адиабатного процесса расширяющейся плазмы.

В работе [13], по наблюдениям на радиотелескопе РАТАН-600, показано, что отдельные наиболее интенсивные источники мелкомасштабной структуры КД (ММС) отождествляются с яркими корональными точками, видимыми на ультрафиолетовых и рентгеновских изображениях Солнца.

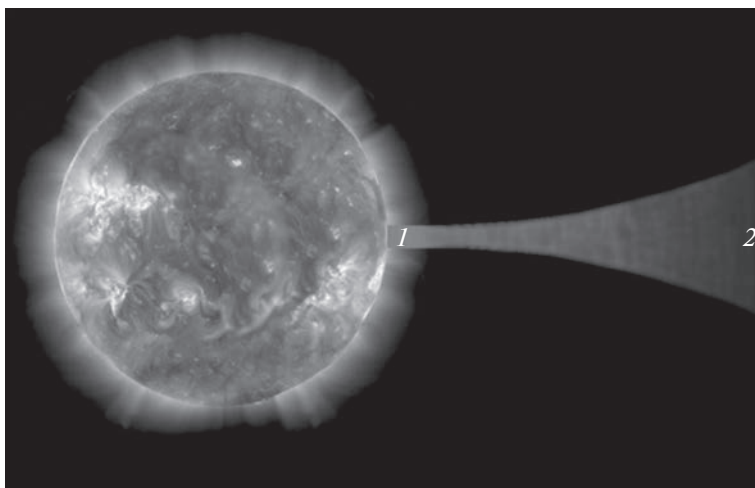


Рис. 3. Схема возникновения падающего спектра КД на низких частотах под влиянием адиабатического процесса. Из области 1 излучаются более высокие частоты, температура плазмы здесь сравнима с температурой среды, окружающей КД (~6000 К).

Эффективные радиоразмеры этих точек в КД практически постоянны и равны 20 ± 5 секундам дуги. Их яркостная температура растет с ростом длины волны. Из различия спектров излучения КД (падающий радиоспектр с ростом длины волны) и ММС (растущий радио спектр с ростом длины волны), можно сделать заключение, что у ММС отсутствует адиабатический процесс, подобный таковому в КД. Что может означать, что ММС не включены в поток плазмы от Солнца, наблюдаемый в КД.

Можно полагать, что спектры радиоизлучения ряда солнечных образований тоже подвержены влиянию АП, причем – АП в широком смысле, как сжатие, так и расширение. При сжатии имеем растущий спектр на низких частотах, назовем такой спектр “адиабатный спектр +”, (АС+), при расширении – падающий спектр на низких частотах, назовем такой спектр “адиабатный спектр–”, (АС–). В этой терминологии радиоспектр КД будет обозначаться как АС–.

3. НЕОДНОРОДНОСТИ СПЕКТРОВ КРОНАЛЬНЫХ ДЫР, СПОКОЙНОГО СОЛНЦА И АКТИВНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ НАД ПЯТНАМИ

Из перечисленных в разделе 2 механизмов генерации электромагнитных волн отдельными частицами, механизм 5 (излучение при атомных и молекулярных процессах, т.е. при переходах свободных электронов на дискретные энергетические уровни и при переходах между дискретными уровнями в атомах и молекулах) на Солнце не создает основную энергию излучения. В условиях Солнца переходы между дискретными уровнями в атомах создают дискретные по частоте линии,

которые в полном спектре излучения выглядят как неоднородности (не гладкость) спектра. На рис. 2 наиболее однородным выглядит спектр СС, а спектр АО – самым неоднородным. В [8] показано, что с большой вероятностью неоднородность спектра АО связана с тем, что в спектре солнечных активных образований над пятнами должны наблюдаться многочисленные рекомбинационные радиолнии водорода и других элементов.

В работах [5, 6] показано, что в спектре СС наблюдается линия тонкой структуры второго квантового состояния атома водорода на частоте 9845 МГц (3.05 см). На рис. 4 представлены спектры СС и КД в этой области частот.

Спектр СС взят из [6], он представляет собой средний спектр из 37 спектров, полученных из скана Солнца за 20.04.2018 в диапазоне -900° – $+900^{\circ}$ от нулевого меридиана Солнца. В этом спектре видна слабая, но достоверно установленная линия излучения, вероятность обнаружения составляет $p > 0.995$. На рисунке окраска линий 1, 2, 3 относится: 1 – к измеренному спектру СС, 2 – к теоретической форме радиолнии, 3 – к модели этой линии, сглаженной каналами спектрографа. В спектре КД, не достоверно, с вероятностью $p = 0.52$, видна линия поглощения.

Далее сравним неоднородности спектров СС, АО и КД.

На рис. 5 показан средний спектр (из 22-х) КД. Для нахождения его неоднородности спектр аппроксимируется гладкой функцией и находится разность между спектром и функцией. Спектр этой разности и представляет собой неоднородности спектра КД. Приводим уравнение функ-

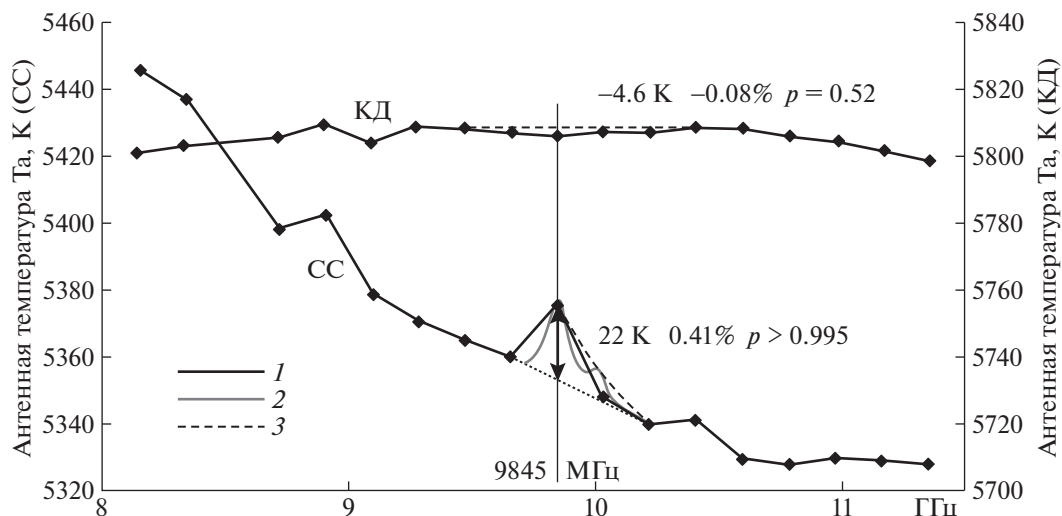


Рис. 4. Сравнение средних спектров спокойного Солнца (СС) и корональных дыр (КД) в области частоты линии водорода 9845 МГц.

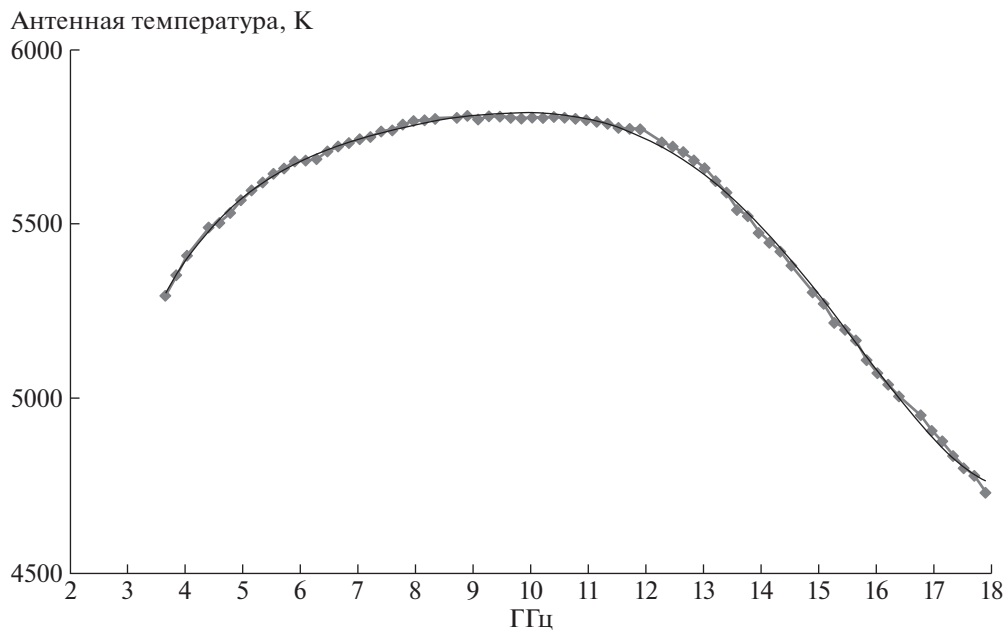


Рис. 5. К поиску неоднородности спектра КД.

ции, аппроксимирующей средний спектр КД, и величину достоверности аппроксимации R^2 .

$$y = 0.0316x^5 - 1.6615x^4 + 33.056x^3 - 324.44x^2 + 1632.6x + 2332, \\ R^2 = 0.9985.$$

Такие же процедуры проведены и над средними спектрами СС и АО.

На рис. 6 приведены спектры неоднородностей для средних спектров СС, КД и АО в процен-

тах от их полных спектров. Среднеквадратические значения (σ) неоднородностей составляют: для СС – 0.23%, для КД – 0.23%, для АО – 1.81%. То есть, неоднородности АО почти в 8 раз превышают неоднородности СС и КД. Для отдельных мощных АО, например АО 12673, это отношение σ неоднородностей составляет ~20 [8]. В нашей работе [8] на основании наличия больших неоднородностей в АО показано, что с большой вероятностью в спектрах АО должно наблюдаться множество рекомбинационных радиолиний водорода и других элементов, а в СС – их отсут-

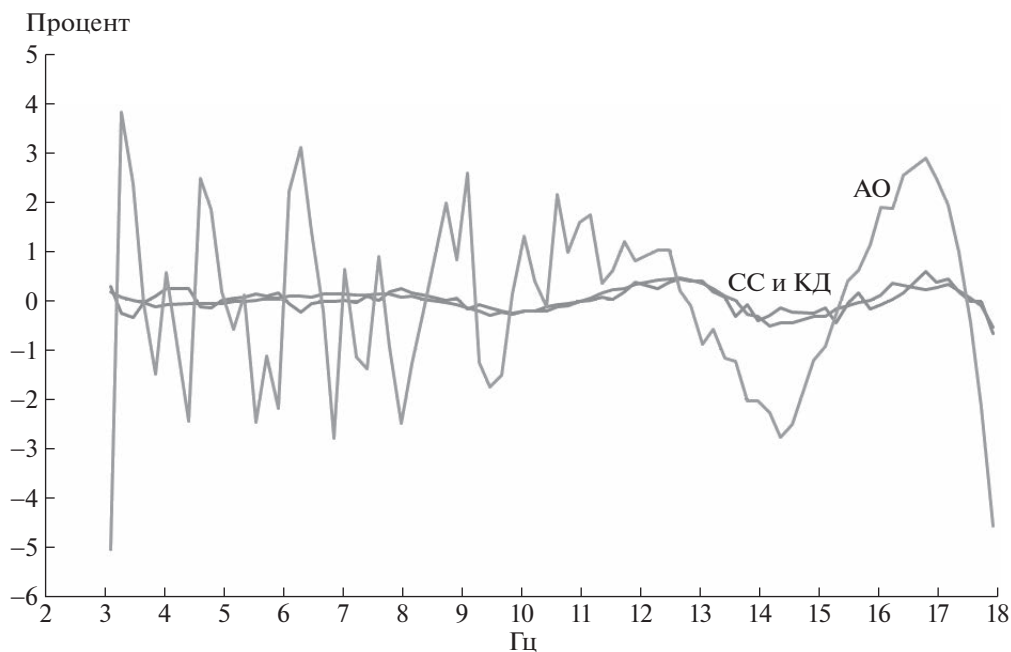


Рис. 6. Спектры неоднородностей СС, АО и КД в процентах от их полных спектров. Среднеквадратические значения (σ) неоднородностей составляют: для СС — 0.23%, для КД — 0.23%, для АО — 1.81%.

ствии. Из представленных результатов следует, что рекомбинационных радиолиний нет и в корональных дырах.

4. ДИСКУССИЯ

Корональные дыры КД Солнца наблюдаются давно на различных частотах от радио до рентгена. Широкий спектр КД по наблюдениям на радиотелескопе РАТАН-600 и других инструментах ранее обсуждали в [13–16]. Полученные ими средние спектры КД показывают набор свойств, характерных для адиабатического процесса: неотличимость спектра КД от спектра спокойного Солнца на высоких частотах и завал спектра на низких частотах. Однако авторы работ не сопоставили эти свойства спектра КД с адиабатическим процессом. Мы надеемся, что предложенное нами объяснение такого спектра адиабатным процессом расширяющейся плазмы АС– окажется справедливым. Предположительно, этому процессу, который имеет и альтернативный вариант АС+ (сжатие плазмы), должны быть подвержены и другие явления на Солнце. Первыми кандидатами на обнаружение в них адиабатных процессов являются солнечные пятна.

Естественно, такие спектры желательно наблюдать на крупных радиотелескопах с карандашной диаграммой направленности.

Нуждается в объяснении тот факт, что завал спектра КД на низких частотах начинается примерно от 10 ГГц.

Требуют объяснения и загадочные яркие детали малого размера в составе КД, которые имеют не падающий, а растущий спектр на низких частотах [13] и, следовательно, не участвуют в одновременном с КД потоке плазмы, направленном от Солнца.

5. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследован средний радиоспектр 22-х корональных дыр Солнца (КД) в диапазоне частот 3–18 ГГц, располагавшихся не далеко от центра диска Солнца. Получены следующие результаты.

1. КД имеют спектр, резко отличающийся как от спектра спокойного Солнца СС, так и от спектра активных образований над пятнами АО. Спектр КД на частотах выше 10 ГГц совпадает со спектром СС, а на частотах ниже 10 ГГц происходит быстрый завал спектра.

2. Предложено объяснение такого спектра присутствием адиабатического процесса в потоке быстро расширяющейся плазмы.

3. Показано, что в КД нет рекомбинационных радиолиний любых элементов. Предположительно в них нет и линии тонкой структуры водорода (9845 МГц).

БЛАГОДАРНОСТИ

Благодарим за помощь А.Д. Шрамко и С.А. Гусеву.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *M. Waldmeier*, *Z. Astrophys.* **38**, 219–36 (1956).
2. *S. R. Cranmer*, *Living Rev. Solar Phys.* **6**, 3 (2009).
3. *В. М. Богод, А. М. Алесин, А. А. Перваков*, *Астрофиз. бюлл.* **66**, 2 (2011).
4. *J. P. Wild*, *Astrophys. J.* **115**, 206 (1952).
5. *А. Ф. Дравских, З. В. Дравских*, *Астрон. журн.* **65**, 199 (1988).
6. *А. Ф. Дравских, Н. Г. Петерова, Н. А. Топчило*, *Астрон. журн.* **96**, 246 (2019).
7. *А. Ф. Дравских, Ю. А. Дравских*, *Астрон. журн.* **98**, 694 (2021).
8. *А. Ф. Дравских, Ю. А. Дравских*, *Астрон. журн.* **99**, 496 (2022).
9. *В. В. Железняков* *Радиоизлучение Солнца и планет* (М., 560, 1964).
10. *Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц*, *Статистическая физика. Часть 1 // Теоретическая физика* (М.: Наука, Т. V., 584, 1976).
11. *S. F. Smerd*, *Australian J. Sei. Res. A* **3**, 34 (1950).
12. *J. B. Zirker*, *Rev. of Geophys. and Space Phys.* **15**, 257 (1977).
13. *В. Н. Боровик, В. Г. Медарь, В. И. Гараимов*, *Тр. междунар. конф. “Солнце в максимуме активности и солнечнозвездные аналоги” Пулково 17–22 сентября 2000 г.* (СПб.: ГАО РАН, 112–114, 2000).
14. *M. D. Papagiannis and K. B. Baker*, *Sol. Phys.* **79**, 365–374 (1982).
15. *V. N. Vorovik, M. S. Kurbanov, M. A. Livshits, and V. I. Ryabov*, *Sov. Astron.* **34**, 522 (1990).
16. *О. А. Голубчина*, *Астрон. журн.* **98**, 332 (2021).