

АДИАБАТНЫЙ СПЕКТР РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ОБЛАКОВ ПЛАЗМЫ, ВЫБРАСЫВАЕМЫХ СОЛНЦЕМ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК, И НЕОДНОРОДНОСТИ СПЕКТРА РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ОБЛАКОВ

© 2024 г. А. Ф. Дравских^{1,*}, Ю. А. Дравских¹

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

*E-mail: dedalfed@mail.ru

Поступила в редакцию 11.12.2023 г.

После доработки 08.01.2024 г.

Принята в печать 29.01.2024 г.

Известно, что в области солнечных пятен систематически возникают так называемые солнечные вспышки. Они сопровождаются излучениями практически во всех диапазонах частот и иногда — выбросом горячей плазмы. Наблюдения на радиотелескопе РАТАН-600 показали, что спектр радиоизлучения облаков плазмы, нагретых до значений порядка 10^6 К, извергаемых из области солнечной вспышки, оказался адиабатным. Высокая корреляция неоднородностей спектров радиоизлучения активного образования над группой солнечных пятен указывает на устойчивое наличие рекомбинационных радиолиний в излучении активного образования. Однако спектры радиоизлучения облаков горячей плазмы, выбрасываемых из области солнечных вспышек, происходящих в этой группе пятен, никакой корреляции не показывают.

Ключевые слова: солнечные пятна, солнечные вспышки, активные радиообразования над солнечными пятнами, адиабатный спектр радиоизлучения облаков плазмы, корреляция спектров радиоизлучения

DOI: 10.31857/S0004629924020082 EDN: КТАСУ1

1. ВВЕДЕНИЕ

Солнечная вспышка — это явление взрывообразного локализованного электромагнитного излучения в атмосфере Солнца. Во время вспышки вещество может быть разогрето до температур $\sim 10^7$ К. Такой нагрев приводит к испусканию больших потоков ультрафиолетового и рентгеновского излучения, а также видимого света. Кроме того, вспышки стремятся выбрасывать наружу большое количество плазмы со скоростью порядка 1000 км/с и выше. Продолжительность вспышки составляет от минут до часа. Вспышки происходят в областях солнечных групп пятен и по мощности их излучения в рентгене разбиты на классы А, В, С, М, Х. Самый слабый класс — А. Диапазон мощностей двух соседних классов вспышек отличается на порядок. Все классы, кроме Х, могут изображаться так: например, М1, ..., М3.2, ..., М9. Вспышка М3.2 мощнее М1 в 3.2 раза, а М9 — в 9 раз. Для класса Х предела мощности не предусмотрено. Например, может быть Х18. Вспышки Х n , где $n > 9$, иногда называют вспышками супер Х класса. Они очень редки.

С.И. Сыроватский предложил модель солнечной вспышки, основанную на фундаментальных свойствах пересоединяющего токового слоя [1]. В работе

[2] содержится широкий обзор физических явлений, возникающих в результате пересоединения — от лабораторных машин, магнитосферы Земли и атмосферы Солнца до вспыхивающих звезд и астрофизических аккреционных дисков. Обширный материал по солнечным вспышкам можно найти в [3–6]. Над группами пятен всегда существуют достаточно стабильные активные образования (АО), излучающие в радиодиапазоне.

Выброс корональной массы при вспышках (ВКМ), или coronal mass ejection (СМЕ), попадает в поток плазмы, называемый солнечным ветром (СВ), постоянно испускаемый короной. Существование СВ теоретически предсказал E.N. Parker [7, 8]. ВКМ может содержать достаточно сильное, встроенное в него магнитное поле. ВКМ, взаимодействуя с СВ, изменяет свои параметры и возмущает СВ. Если ВКМ был выброшен в направлении Земли, то при достижении ее он вызывает возмущение магнитного поля Земли (геомагнитную бурю) и полярные сияния. ВКМ опасны для космических кораблей и космонавтов. В [6] показано, что солнечные вспышки редко создают ВКМ. Физические связи между этими явлениями до сих пор однозначно не установлены и являются предметом интенсивных исследований.

Радиотелескоп РАТАН-600 (РТ) проводит практически ежедневные наблюдения Солнца. Спектральный комплекс радиотелескопа обладает большим диапазоном анализируемого спектра (3–18 ГГц, 10–1.7 см) — 84 канала шириной ~100 МГц, расставленных через 187.5 МГц [9]. РТ имеет диаграмму направленности ножевой формы (28''×20' на волне 3 см). Наблюдения проводятся в пассажном режиме в ряде азимутов в диапазоне -30° и $+30^\circ$ относительно меридиана РТ. Архив результатов наблюдений находится в открытом доступе на сайте <http://www.spbf.sao.ru/prognoz/>.

В этой работе рассматриваются спектры радиоизлучения АО, наблюдаемые во время солнечных вспышек. Обнаружено, что облака плазмы, извергаемые Солнцем во время вспышек достаточно высокого класса М и X, имеют адиабатный спектр радиоизлучения. Термин «адиабатный спектр» был введен в работе [10]. Найдено также, что неоднородности спектров радиоизлучения АО, полученные в разное время, имеют очень высокий коэффициент корреляции, что указывает на наличие рекомбинационных радиолиний в АО [11]. Однако неоднородности спектров радиоизлучения облаков горячей плазмы, выбрасываемых из области солнечных вспышек, происходящих в этой группе пятен, никакой корреляции не показывают.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

На рис. 1 показана совокупность солнечных пятен по состоянию на 06.09.2017.

На рис. 2 показан скан Солнца в азимуте 0° за 06.09.2017.

Доминирующий источник в максимуме имеет антенную температуру 300000 К. Это активное образование АО12673, показанное на рис. 1.

На рис. 3 показаны изменения интенсивности в максимуме спектра АО12673 по наблюдениям РТ в азимуте 0° за весь период пребывания АО12673 на видимой стороне Солнца с 30 августа по 9 сентября 2017 г.

Следует учесть, что 6 сентября не только резко изменилась интенсивность АО, но и максимум интенсивности в его спектре переместился в более высокочастотную область.

Возникает вопрос, какое примечательное событие произошло на Солнце, которое можно было бы связать со скачком интенсивности АО? Оказалось, что в группе пятен, где находилось АО, 6 сентября произошло 6 солнечных вспышек различных классов. Приводим перечень этих вспышек, полученный

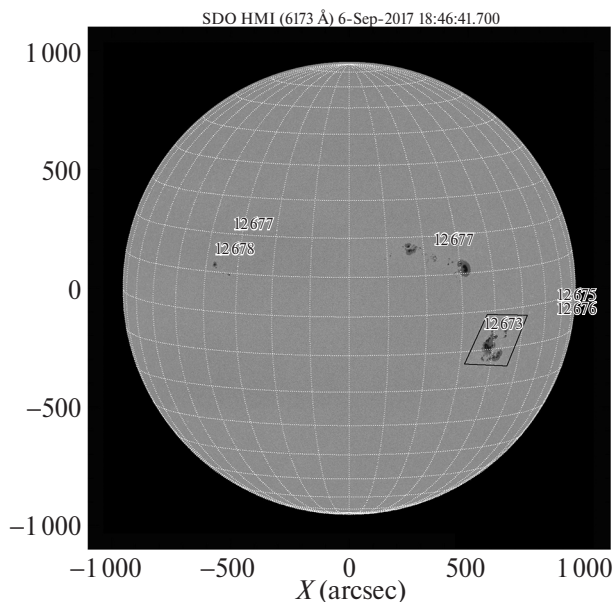


Рис. 1. Группы солнечных пятен 06.09.2017 и соответствующие им АО. Группа 12673 выделена.

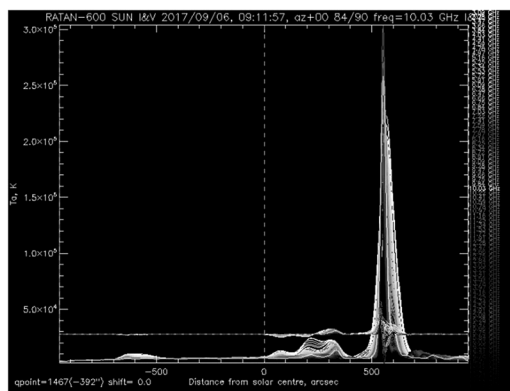


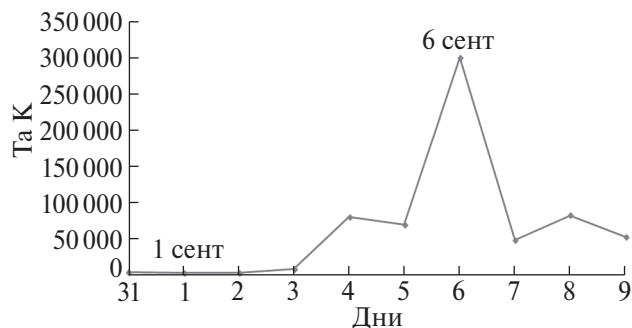
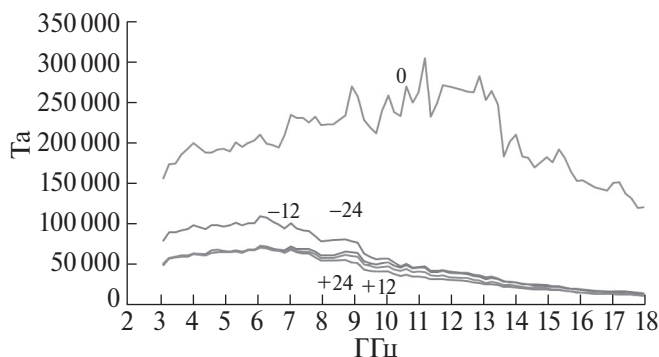
Рис. 2. Скан Солнца на радиотелескопе РАТАН-600 в азимуте 0° за 06.09.2017.

по наблюдениям в рентгеновском диапазоне спутниками GOES, публикуемым [12] на сайте https://thesis.xras.ru/sun_flares.html?m=9&d=6&y=2017.

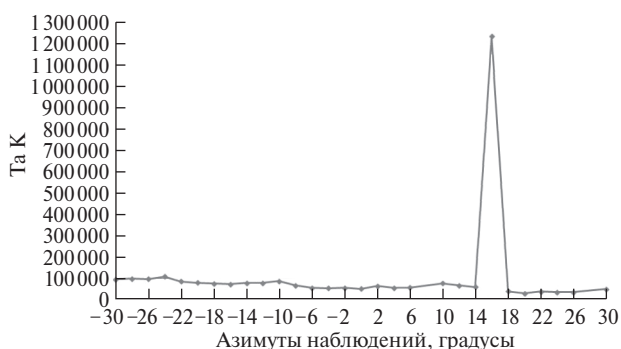
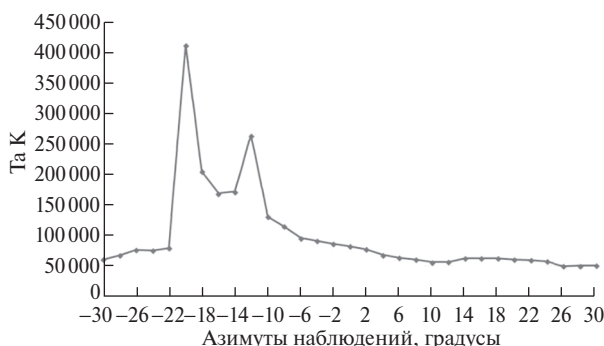
В табл. 1 показано всемирное время UT, в отличие от UT +3:00, представленного на сайте. 6 сентября РТ наблюдал в азимутах -24° , -12° , 0° , $+12^\circ$, $+24^\circ$, что соответствует значениям UT 07:35:20, 08:23:39, 09:11:57, 10:00:14, 10:48:32. Длительность наблюдения в каждом азимуте составляет ~127 секунд. Поскольку вспышки происходили в АО12673, то UT, соответствующие моменту прохождения диаграммой антенны АО12673 будут, соответственно, 07:35:56, 08:24:15, 09:12:33, 10:00:50, 10:49:08. Сопоставив эти значения с таблицей, видим, что близко по времени совпадают: вспышка класса C2.7 с прохождением АО12673 в азимуте -24° и вспышка класса X2.2 в азимуте 0° . Слабая вспышка C2.7

Таблица 1. Солнечные вспышки, произошедшие в АО12673 06.09.2017 г.

Активная область 12673	Начало	Максимум	Окончание
Вспышка класса M1.4	19:21:00	19:30:00	19:35:00
Вспышка класса M2.5	15:51:00	15:56:00	16:03:00
Вспышка класса X9.3	11:53:00	12:02:00	12:10:00
Вспышка класса X2.2	08:57:00	09:10:00	09:17:00
Вспышка класса C2.7	07:29:00	07:34:00	07:48:00
Вспышка класса C1.6	06:17:00	06:22:00	06:29:00

**Рис. 3.** Изменения интенсивности в максимуме спектра АО12673 по наблюдениям РТ в азимуте 0° за весь период пребывания АО на видимой стороне Солнца с 30 августа по 9 сентября 2017 г.**Рис. 4.** Спектры в максимумах излучения АО 12673 при наблюдениях Солнца 6 сентября 2017 г. в азимутах -24°, -12°, 0°, +12°, +24°.

в радиодиапазоне никак не проявилась, а мощная, класса X2.2, привела к многократному росту интенсивности радиоизлучения в АО12673. Кроме того, как показано на рис. 4, спектр этого внезапного всплеска излучения в азимуте 0° кардинально отличается от спектра излучения АО12673 в других азимутах. Спектр в азимуте 0° является адиабатным спектром [10], такой спектр возникает у излучения плазмы, движущейся в магнитном поле, имеющем сильно расходящуюся конфигурацию силовых линий. Именно такой спектр с завалом на нижних частотах характерен для солнечного ветра, испускаемого корональными дырами. Поскольку корональ-

**Рис. 5.** Интенсивность радиоизлучения АО12673 07.09.2017 в азимутах.**Рис. 6.** Интенсивность радиоизлучения АО12673 08.09.2017 в азимутах.

ные дыры являются достаточно долгоживущими образованиями, то их излучение с адиабатным спектром можно наблюдать в ряде азимутов и даже дней.

Поскольку мы наблюдаем всплеск интенсивности АО только в азимуте 0° и время всплеска 09:12:33 примерно совпадает со временем солнечной вспышки 09:10:00, то можно считать, что на РАТАНе-600 наблюдалось радиоизлучение облака корональной плазмы, выброшенного из области солнечной вспышки.

Подобные всплески радиоизлучения, связанные с солнечными вспышками в той же области АО12673 наблюдались 7 и 8 сентября. В эти дни РТ наблюдал Солнце в 31 азимуте от -30° до +30° через каждые 2°. На рис. 5 и 6 показаны интенсивности излучения АО12673 в азимутах за эти дни.

7 сентября произошло 11 солнечных вспышек, 3 из них, классов C2.3, M1.4, M7.3, попали в поле зрения РТ, и только M7.3 привела к мощному всплеску радиоизлучения в АО12673 в азимуте +16°. 8 сентября была 21 солнечная вспышка, из них в поле зрения РТ попало 4 вспышки классов C6, M8.1, C1.3, C1.6, и только M8.1 привела к всплеску радиоизлучения в АО12673 в азимуте -20°. Более слабый всплеск радиоизлучения в азимуте -12° не имеет

Таблица 2. Сравнение моментов появления солнечных вспышек и всплесков радиоизлучения в АО12673

Даты, сентябрь	Максимум солнечной вспышки	Максимум радиовсплеска
6	09:10:00	09:12:33
7	10:15:00	10:16:40
8	07:49:00	07:51:47

соответствующей, близкой по времени, солнечной вспышки.

Солнечные вспышки принято делить на импульсные и постепенные в зависимости от длительности всплеска мягкого рентгеновского излучения. Вспышки двух классов имеют разные временные и пространственные характеристики, а также отличаются своей энергетикой, наличием или отсутствием СМЕ [6]. Возможно, 8 сентября произошла совокупность такого класса вспышек, и поэтому вид всплеска радиоизлучения в АО заметно отличается от всплесков за 6 и 7 сентября.

В приведенной ниже табл. 2 указаны значения всемирного времени UT, соответствующие таким событиям, как время максимума солнечной вспышки и время максимума всплеска радиоизлучения в АО12673.

Во всех случаях солнечные вспышки происходили раньше радиовсплесков на время от ~1.5 до ~3 минут. Обратим внимание, что значения времени для максимумов солнечных вспышек в рентгене приводятся с точностью до минуты.

3. НЕОДНОРОДНОСТИ СПЕКТРОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

На рис. 7 приведены спектры радиоизлучения АО12673 за 6 сентября 2017 г. в азимутах -12° и $+12^\circ$, аппроксимированные полиномами 5-й степени.

Неоднородностями спектра мы называем разность между спектром и гладкой кривой, аппроксимирующей спектр. Видна корреляция неоднородностей этих спектров. Однако для вычисления коэффициента корреляции неоднородностей необходимо их выделить. На рис. 8 приведены эти неоднородности, представленные как процент от интенсивности. Коэффициент их корреляции (КК) составляет 0.92. Обратим внимание — наблюдения в азимуте -12° предшествуют, а в азимуте $+12^\circ$ следуют за наблюдениями в азимуте 0° , в котором произошел выброс облака горячей корональной плазмы из области солнечной вспышки. Корреляция неоднородностей спектров АО12673 в других азимутах

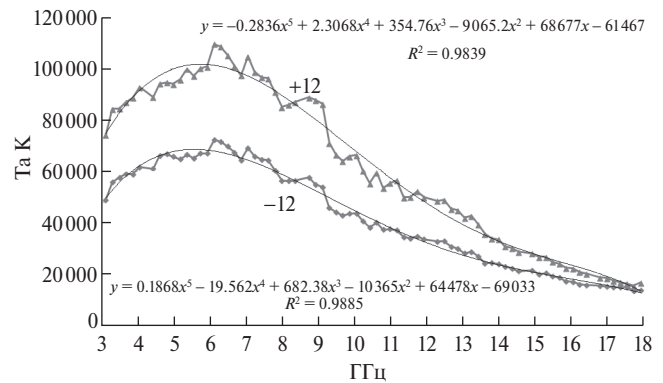


Рис. 7. Спектры радиоизлучения АО12673 за 6 сентября 2017 г. в азимутах -12° и $+12^\circ$, аппроксимированные полиномами 5-й степени. Приведены полиномы и величины достоверности аппроксимации R^2 .

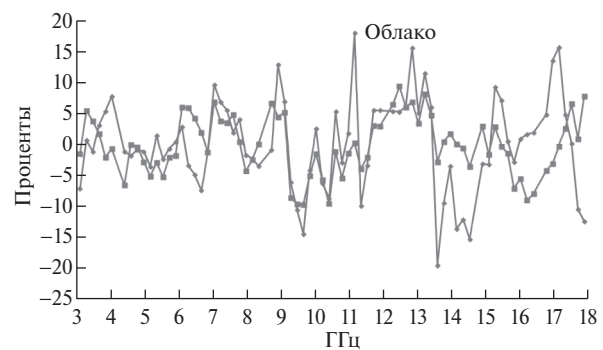


Рис. 8. Неоднородности спектров радиоизлучения АО12673 за 6 сентября 2017 г. в азимутах -12° и $+12^\circ$. Коэффициент их корреляции составляет 0.92.

сохраняется близкой к 0.9. Она остается достаточно высокой и при сравнении неоднородностей спектров АО за разные дни наблюдений.

Однако корреляция неоднородностей спектров облака плазмы и АО за 6 сентября практически отсутствует. Это показано на рис. 9.

Коэффициент корреляции неоднородностей спектров радиоизлучения облака и АО в азимуте -12° за 6 сентября составляет 0.398.

Интенсивность этих неоднородностей, определяемая как среднеквадратические отклонения в процентах от интенсивностей облака и АО, составляют, соответственно, 7.59 и 4.79%.

На рис. 10 показаны спектры в максимумах излучения АО 12673 при наблюдениях Солнца 7 сентября 2017 г. в азимутах от -30° до $+30^\circ$.

Спектры излучения АО за 07.09.2017 во всех азимутах, кроме азимута $+16^\circ$, сходны и расположены ниже уровня $T_a < 10^5$ К. В азимуте $+16^\circ$ спектр стал адиабатным и мощность излучения в максимуме превзошла $1.2 \cdot 10^6$ К.

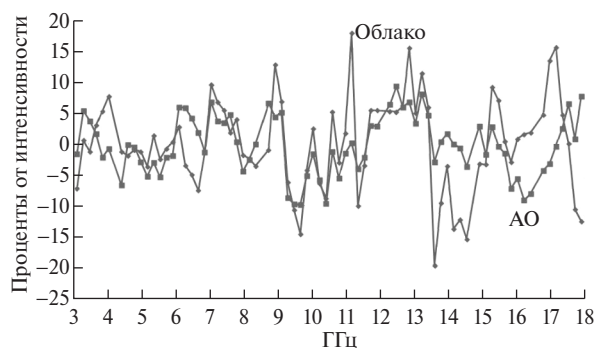


Рис. 9. Неоднородности спектров радиоизлучения облака и АО за 6 сентября 2017 г. в азимуте -12° в процентах от интенсивностей облака и АО.

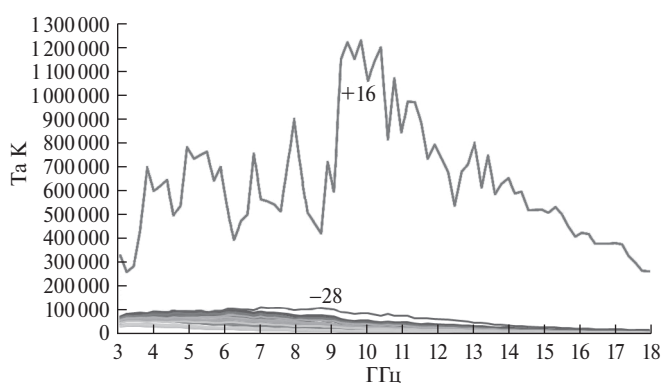


Рис. 10. Спектры в максимумах излучения АО 12673 при наблюдениях Солнца 7 сентября 2017 г. в азимутах от -30° до $+30^\circ$.

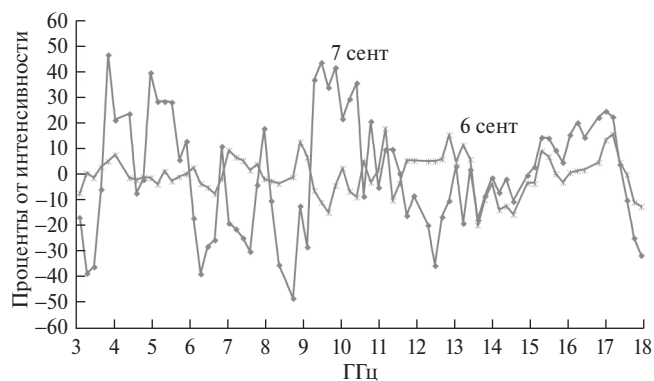


Рис. 11. Неоднородности спектров радиоизлучения облаков корональной плазмы, выброшенных из областей солнечных вспышек за 6 и 7 сентября 2017 г., в процентах от интенсивностей излучения облаков, их $KK = -0.01982$, их интенсивности равны, соответственно, 7.58684 и 22.86702%.

На рис. 11 показаны неоднородности спектров радиоизлучения облаков корональной плазмы выброшенных из областей солнечных вспышек за 6 и 7 сентября 2017 г.

4. ДИСКУССИЯ

На Солнце происходит много солнечных вспышек. Однако большинство из них являются слабыми, класса С. Из рассмотренного выше следует, что выброс облаков горячей корональной плазмы из области вспышки происходит лишь при достаточно мощных вспышках класса М и Х. Группа солнечных пятен 12673 является уникальной. В этой группе с 4 по 8 сентября произошло 65 солнечных вспышек [12]. Из остальных пяти групп, присутствовавших на видимой стороне Солнца, за это же время произошло всего 2 слабые вспышки. В группе 12673 произошла мощнейшая за 20 лет вспышка класса Х9.3. Эта вспышка произошла 6 сентября 2017 г. достаточно поздно и в поле зрения РАТАНА не попала. С этой вспышкой связаны выброс облака корональной плазмы и связанные с ним явления геомагнитной бури [12] очень высокого класса G4 и полярных сияний, продолжавшиеся более суток 9 сентября 2017 г. Поскольку 7 и 8 сентября в той же группе пятен произошли еще вспышки, то приписать бурные явления в атмосфере Земли 9 сентября 2017 г. только облаку из вспышки за 6 сентября невозможно. Отслеживание движения облаков плазмы до столкновения с земной атмосферой — процесс очень сложный и пока не вполне решенный.

Мощные кратковременные всплески радиоизлучения в АО12673 мы отождествили с радиоизлучением облаков плазмы, выброшенных из области вспышки. Кроме того, оказалось, что эти всплески радиоизлучения имеют еще и спектр излучения, радикально отличающийся от спектра самого АО. Спектр радиоизлучения облаков оказался адиабатным [10]. Всплеск радиоизлучения 7 сентября имел место только в азимуте $+16^\circ$. Наблюдения в соседних азимутах происходят через ~ 8 минут. Это значит, что подъем интенсивности и изменение спектра АО длились не более 16 минут. Солнечная вспышка, ответственная за всплеск радиоизлучения [12], длилась 10 минут. Установлено время задержки между солнечной вспышкой, видимой в рентгене, и выбросом облака, наблюдаемого в радиодиапазоне, оно составило от ~ 1.5 до ~ 3 минут.

Большой коэффициент корреляции неоднородностей спектра АО в азимутах -12° и $+12^\circ$ свидетельствует о наличии в излучении АО когерентной составляющей [11] (рекомбинационных радиолиний) и об устойчивых физических условиях в среде АО и независимости этих условий от солнечных вспышек и выбрасываемых ими облаков плазмы.

5. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Показано:

1. Мощный кратковременный всплеск радиоизлучения в активном образовании (АО) отражает процесс выброса корональной массы из области солнечной вспышки, поскольку начало и продолжительность всплеска и солнечной вспышки по времени примерно совпадают.

2. Облака корональной плазмы, выбрасываемые из областей солнечных вспышек, имеют адиабатный спектр радиоизлучения, свидетельствующий о движении плазмы в магнитном поле с резко расходящейся конфигурацией силовых линий магнитного поля.

3. Облака корональной плазмы, выбрасываемые солнечными вспышками, не влияют на физические условия в активных образованиях (АО), излучающих в радиодиапазоне, хотя и солнечные вспышки и АО связаны с одной и той же группой солнечных пятен.

4. Неоднородности спектров радиоизлучения облаков обладают повышенным уровнем по сравнению с таковыми у АО и, в отличие от АО, не показывают присутствия рекомбинационных радиолний в облаках.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. С.И. Сыроватский, Токовые слои и вспышечные процессы в лабораторной и космической плазме (УФН 118 738–741, 1976).
2. E.R. Priest and T. Forbes, Magnetic Reconnection. MHD Theory and Applications (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2000).
3. А.Б. Северный, Н.Н. Степанян, Солнечные вспышки (М., 1976).
4. В.М. Томозов, В.Н. Цытович, Взрывные процессы на Солнце (Знание, М., т. 56, 1979).
5. А.Т. Алтынецев, В.Г. Банин, Г.В. Куклин, В.М. Томозов, Солнечные вспышки (Наука, М., 1982).
6. Л.И. Мирошниченко, Физика Солнца и солнечно-земных связей. Учебное пособие (Университетская книга, М., 2011).
7. Э. Паркер, Солнечный ветер, УФН, Физика наших дней, т. LXXXIV, вып. 1 (1964).
8. E.N. Parker, The Solar Wind, Scient. American **210** (4), 66 (1964).
9. В.М. Богод, А.М. Алесин, А.А. Перваков, Астрофиз. бюлл. **66**, 2 (2011).
10. А.Ф. Дравских, Ю.А. Дравских, Астрон. журн. **100**, 472 (2023).
11. А.Ф. Дравских, Ю.А. Дравских, Астрон. журн. **99**, 496 (2022).
12. Лаборатория солнечной астрономии ИКИ и ИСЗФ РАН (Лаборатория рентгеновской астрономии Солнца Института космических исследований (ИКИ) РАН и Института солнечно-земной физики (ИСЗФ) Сибирского отделения РАН).

ADIABATIC SPECTRUM OF RADIO EMISSION OF PLASMA CLOUDS, EMITTED BY THE SUN DURING SOLAR FLARES, AND INHOMOGENEITIES OF THE SPECTRUM OF RADIO EMISSION OF CLOUDS

A. F. Dravskikh^a, Yu. A. Dravskikh^a

^aSpecial Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences,
St. Petersburg Branch, St. Petersburg, Russia

It is known that so-called solar flares systematically occur in the area of sunspots. They are accompanied by radiation in almost all frequency ranges and sometimes by the emission of hot plasma. Observations on the RATAN-600 radio telescope have shown that the radio emission spectrum of plasma clouds heated to values of the order of 10^6 K erupted from the solar flare region turned out to be adiabatic. The high correlation of the inhomogeneities of the radio emission spectra of active formation over a group of sunspots indicates the stable presence of recombination radio lines in the radiation of active formation. However, the radio emission spectra of hot plasma clouds ejected from the region of solar flares occurring in this group of spots do not show any correlation.

Keywords: sunspots solar flares, active radio formations above sunspots, adiabatic radio emission spectrum of plasma clouds, correlation of radio emission spectra