

УДК 52-77: 520.27: 523.9

Миллиметровое радиоизлучение Солнца: к 50-летию РТ-22 КрАО

В.Г. Нагнибеда, М.А. Лукичева

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9,
Россия, 199034
v.nagnibeda@spbu.ru

Поступила в редакцию 1 октября 2016 г.

Аннотация. Статья приурочена к 50-летию юбилею РТ-22 КрАО – радиотелескопу мирового уровня, на котором были выполнены замечательные работы по изучению солнечного излучения миллиметрового диапазона вплоть до волны 2 мм. Дается краткий исторический обзор работ отечественных ученых по солнечной миллиметровой радиоастрономии. Отмечается особая важность таких работ, так как в отличие от ультрафиолетового излучения, миллиметровое излучение, особенно его коротковолновая часть, генерируется как в относительно горячих, так и в холодных областях солнечной хромосферы, предоставляя тем самым возможность более полной диагностики хромосферной плазмы. Рассматриваются современные проблемы, в частности, в связи с планируемыми наблюдениями Солнца на миллиметровой интерферометрической системе ALMA.

SOLAR MILLIMETER RADIO EMISSION: 50 YEARS OF CRAO RT-22, *by V.G. Nagnibeda, M.A. Loukicheva.* The article is devoted to the 50th anniversary of CRAO RT-22 – a world-known radio telescope, where outstanding studies of the solar radio emission at centimeter and millimeter wavelengths up to 2 mm were carried out. A brief historical review of the Soviet and Russian findings on the topic of solar millimeter radio astronomy is given. The significance of studies at these wavelengths, which are sensitive to both the relatively hot and cool temperatures, thus offering a more complete diagnostics of the dynamic chromosphere, is emphasized. The open questions are considered in the light of the future observations with the millimeter interferometer ALMA.

Ключевые слова: радиоастрономия, миллиметровые волны, хромосфера

В сентябре 1966 года были проведены первые наблюдения на новом полноповоротном радиотелескопе РТ-22, построенном в Крыму на берегу Голубого залива в поселке Качивели.

Радиотелескоп вошел в состав отдела радиоастрономии Крымской астрофизической обсерватории, образованного по инициативе директора обсерватории Андрея Борисовича Северного. Первым заведующим радиоастрономическим отделом стал Иван Григорьевич Моисеев. Он и Юрий Федорович Юровский принимали самое активное участие в строительстве радиотелескопа (Юровский, 2004).

Есть какой-то символический смысл в появлении РТ-22 именно здесь. Ведь недалеко на горе Кошка более ста лет назад была создана Симеизская обсерватория, еще до войны получившая мировую известность. А 70 лет назад в этих местах зарождалась советская радиоастрономия.

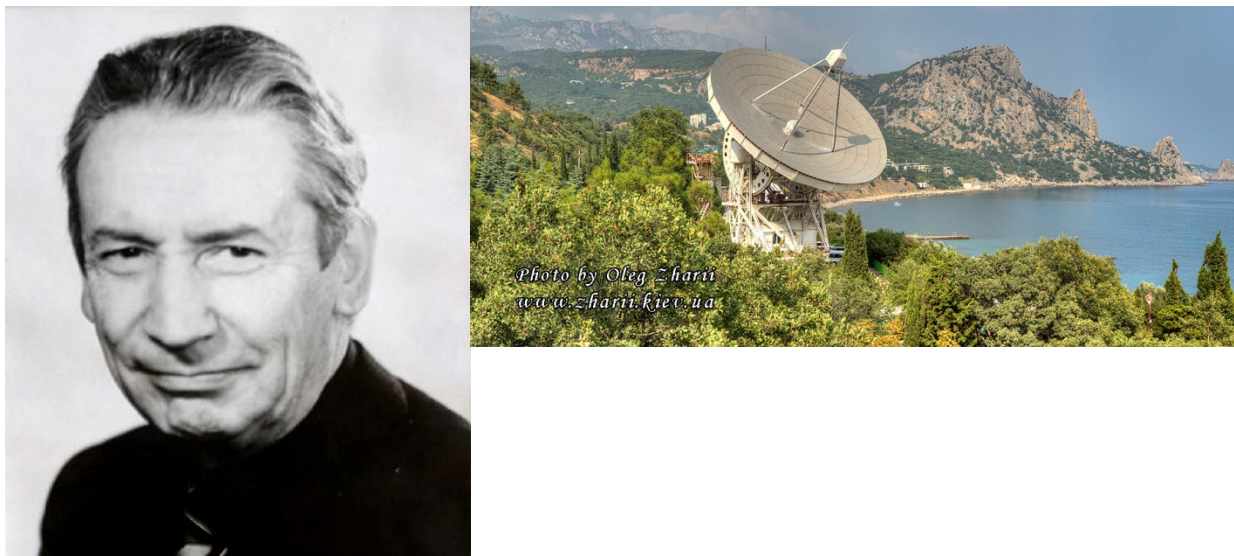


Рис. 1. Директор Крымской астрофизической обсерватории академик Андрей Борисович Северный (1952–1987 гг).

Радиотелескоп РТ-22 в Голубом заливе.



Рис. 2. Первые радиоастрономы КраО Иван Григорьевич Моисеев и Юрий Федорович Юровский (начало 60-х гг.)

Крупные отечественные радиотелескопы солнечной миллиметровой радиоастрономии.

20 мая 1947 года стало знаменательной датой для отечественной астрономии – в этот день сотрудники Физического института АН СССР (ФИАН) С.Э. Хайкин и Б.М. Чихачев, входившие в состав большой экспедиции Академии Наук, успешно пронаблюдали полное солнечное затмение в Бразилии на первом советском радиотелескопе, переделанном из военного радиолокатора. Результаты наблюдений оказались очень важными для солнечной физики: экспериментально было доказано, что солнечное радиоизлучение метрового диапазона генерируется в короне, а корональная плазма имеет температуру около двух миллионов градусов. Эти результаты были официально признаны открытием, а дата 20 мая 1947 года считается днем рождения советской (и российской) радиоастрономии.

Вскоре в Кацивели возникла Радиоастрономическая станция ФИАН. В эти же годы радиоастрономические исследования начались и в других научных центрах: НИРФИ (г. Горький), ИЗМИРАН, Пулковская обсерватория. Первые радиотелескопы были небольшого размера и имели для большинства астрономических задач слишком низкое угловое разрешение. При обсуждении вопроса о создании крупных радиотелескопов большое значение имела позиция Семена Эммануиловича Хайкина, считавшего наиболее перспективным освоение миллиметрового и сантиметрового диапазонов. В Пулково, куда Хайкин был приглашен, был построен Большой пулковский радиотелескоп (БПР) сантиметрового диапазона – прообраз будущего РАТАН-600 (1956 год), а в Пушино, куда переместилась Радиоастрономическая станция ФИАН, построили РТ-22 конструкции П.Д. Калачева (1959 год). Благодаря оригинальным конструктивным и технологическим решениям, антенна радиотелескопа при больших размерах имеет высокую точность поверхности, что обеспечивает возможность наблюдений на волнах от 4 мм и длиннее. В то время РТ-22 ФИАН стал в своем классе крупнейшим радиотелескопом миллиметрового диапазона. Второй телескоп РТ-22 для Крымской обсерватории построен семью годами позже с учетом опыта создания и работы пушинского, имеет вдвое лучшую поверхность и более совершенную систему управления, что позволяет проводить наблюдения на коротких миллиметровых волнах до 2 мм. Эти замечательные инструменты в течение 15–20 лет были лучшими в мире радиотелескопами миллиметрового диапазона. Позже по подобному принципу были построены два миллиметровых радиотелескопа с размером зеркала более 7 м, РТ-7.5, для МГТУ им. Баумана (1975 г., Дмитров) для коротких миллиметровых волн от 1 мм. А в НИРФИ для такого же диапазона создали радиотелескоп системы Крауса РТ-25 × 2 (1967 год), имевший ножевую диаграмму с рекордным угловым разрешением 13 угл. сек на волне 1 мм. Эти замечательные радиотелескопы образовали мощную инструментальную базу отечественной солнечной радиоастрономии, способствовали активному изучению верхних слоев солнечной атмосферы, в те годы еще малодоступных для наблюдений в других диапазонах. Наблюдательные результаты стимулировали развитие теоретических исследований солнечных явлений. Успехи отечественной солнечной радиоастрономии обеспечили ей прочный авторитет в мировой науке.



Рис. 3. Павел Дмитриевич Калачев и “семейство” крупных миллиметровых радиотелескопов

Активные области в миллиметровом излучении. Уже первые наблюдения Солнца на крупных радиотелескопах (БПР на см волнах и РТ-22 ФИАН на 8 мм) подтвердили существование источников повышенной радиояркости над активными областями на диске Солнца (локальные источники, ЛИ). Особенно наглядным было наложение двумерных радиокарт, которые строились путем сканирования диска Солнца узкой (1.5 угл. мин) карандашной диаграммой направленности РТ-22 на волне 8 мм, и оптических гелиограмм: каждой активной области соответствовал хорошо совпадающий по размерам и положению ЛИ. Однако в отличие от сантиметрово-

Миллиметровое радиоизлучение Солнца...

вого диапазона, миллиметровые ЛИ были значительно слабее, их яркостная температура не превышала 10000 К, но и в них можно было выделить более яркую деталь над группой пятен и более слабый широкий источник над флоккулярным полем. Эти исследования были выполнены Александром Ефимовичем Саломоновичем с участием У. Хангильдина. В дальнейшем была обнаружена круговая поляризация ЛИ (Саломонович, 1962; Хангильдин, 1964). Эпизодически проводились наблюдения на волне 4 мм, но качество карт было значительно хуже. Сейчас кажется поразительным, сколько сил, времени, упорства, изобретательности требовалось для проведения наблюдений. Ведь практически все процедуры – от управления телескопом до построения карт – делались вручную, и на получение одной карты тратилось несколько часов. Тем не менее, уже тогда были определены основные характеристики миллиметрового излучения Солнца. Интерпретация результатов наблюдений в те годы основывалась на работе Вальдмайера и Мюллера (1950), утверждавших, что ЛИ обусловлены тепловым тормозным излучением корональных конденсаций, а относительно низкая яркостная температура миллиметровых источников объяснялась малой оптической толщиной корональных конденсаций в этом диапазоне, а это значит, что спектр потоков ЛИ должен быть плоским. Такая точка зрения, помимо всего прочего, формировала представление о малой информативности миллиметровых наблюдений, поддерживаемого к тому же значительными техническими трудностями наблюдений из-за сильного влияния земной атмосферы и худшей чувствительности приемников.



Рис. 4. Виктор Александрович Ефанов в аппаратной РТ-22

Радикальное изменение представлений о природе ЛИ связано с результатами затменных наблюдений в сантиметровом диапазоне. Андрей Павлович Молчанов собрал результаты наблюдений отдельных источников на разных волнах и построил спектр их излучения в сантиметровом диапазоне (Молчанов, 1961). Эти спектры показывали наличие сильно выраженного максимума в середине диапазона со спадом потока в длинноволновую и, особенно, в коротковолновую часть спектра. Такой спектр удалось объяснить с привлечением магнитотормозного механизма солнечной плазмы в сильном магнитном поле солнечных пятен, теорию которого детально разработал В.В. Железняков (1962). Дополнительным аргументом послужили поляризационные наблюдения, показавшие наличие сильно поляризованного источника на небольшой высоте над отдельными пятнами (Корольков, Соболева, 1961). Последующие многолетние

наблюдения локальных источников на БПР утвердили основную роль магнитотормозного излучения в сантиметровом диапазоне. Однако на волнах короче 8 мм этот механизм в условиях солнечных активных областей перестает работать, и представление о корональных конденсациях еще долго появлялось в публикациях.

В решении этой проблемы важную роль сыграли многоволновые наблюдения Солнца на РТ-22 КраО. Отличные характеристики радиотелескопа, его южное расположение способствовали тому, что основные солнечные наблюдательные программы были перенесены из Пушино в Казивели. Необходимо было оснастить радиотелескоп приемной аппаратурой. Этим занимался Виктор Александрович Ефанов, создавший комплект приемников на волны 8 и 13.5 мм. Однако возможности КраО в этой области были очень ограничены. А в НИРФИ и ИПФАН в Горьком имелись сильные лаборатории, разрабатывающие приемники миллиметрового диапазона. Поэтому большие серии солнечных наблюдений на РТ-22 КраО, особенно в первый период, были выполнены совместно с группами А.Г. Кислякова (волны 2, 4, 6 и 8 мм) и Л.И. Федосеева (волны 1–3 мм) (Ефанов и др., 1972, 1973).

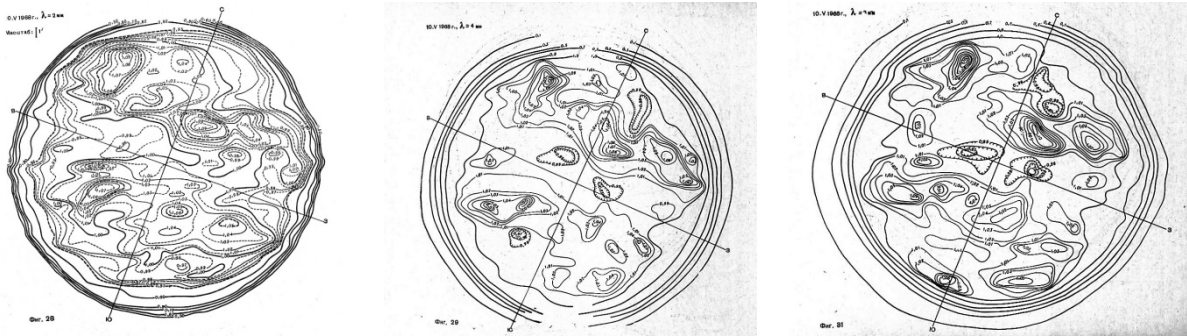


Рис. 5. Радиокарты Солнца, РТ-22 КраО, волны 2, 4 и 8 мм, 10 мая 1968 г.

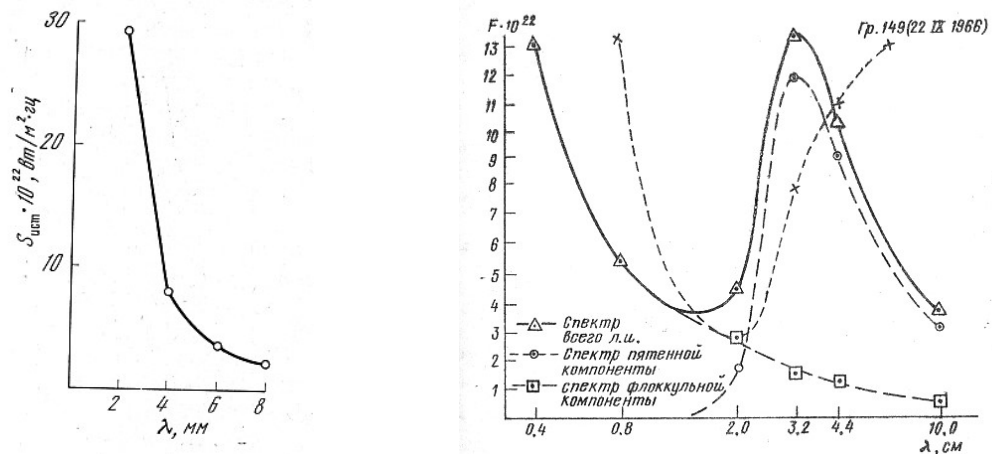


Рис. 6. Спектр миллиметровых ЛИ: слева – усредненный по наблюдениям на РТ-22 КраО; справа – спектр одного ЛИ в сантиметровом и миллиметровом диапазонах по наблюдениям на БПР и РТ-22 ФИАН, и модельный расчет спектра (Нагнибеда, 1977)

Однако и методика наблюдений, и процедура построения солнечных карт были еще несовершенны (получение одной карты занимало 2–2.5 часа). На разных волнах наблюдения проводились в разное время, из-за сильного влияния атмосферы на коротких волнах карты получа-

Миллиметровое радиоизлучение Солнца...

лись сильно зашумленными. Поэтому главным результатом этой серии наблюдений явилось построение спектра потоков, усредненного по всем наблюдавшимся в разное время источникам. Вид этого спектра наряду с низкими (меньше 10000 К) яркостными температурами свидетельствовал о том, что миллиметровые источники находятся в хромосфере.

Подобный результат получен и в работе (Нагнибеда, 1977), в которой для двух конкретных ЛИ построен спектр в сантиметровом и миллиметровом диапазоне и сделан вывод о том, что локальные источники миллиметровых и сантиметровых диапазонов существенно различны: одни определяются параметрами хромосферы, другие отражают условия переходной области с гораздо более высокими температурами и сильным магнитным полем.

Еще одним аргументом в пользу такой точки зрения стало исследование вклада источников над пятнами в полное излучение всей активной области. Если в сантиметровом диапазоне этот вклад определяющий – над отдельными пятнами наблюдаются яркие источники, то в миллиметровой области этот вклад незначителен, и можно ожидать, что в этом диапазоне яркий источник над пятнами сменится на темное пятно, как в оптике. Уместно отметить, что с попытки решить упомянутую проблему начались солнечные наблюдения на крупном радиотелескопе коротких миллиметровых волн РТ-7.5 МГТУ: в декабре 1982 года совместная группа сотрудников АИ ЛГУ (СПбГУ) и МГТУ им. Баумана пронаблюдали частное солнечное затмение. Покрытие/открытие активной области в ходе затмения не показало наличия выделенного источника над пятном. Наше сотрудничество стало активно развиваться и продолжается до сих пор. Огромная заслуга в развитии солнечных наблюдений на РТ-7.5 принадлежит профессору МГТУ Борису Алексеевичу Розанову. Его энтузиазм, большой интерес к солнечной физике сделали РТ-7.5 единственным крупным, регулярно работающим солнечным инструментом на коротких миллиметровых волнах. Конечно, угловое разрешение радиотелескопа (2.5 угл. мин на волне 3.4 мм) было недостаточным для детального изучения структуры активной области, но статистическое сравнение большого числа источников, наблюдавшихся практически одновременно на РТ-7.5 на волне 3.4 мм и на радиогелиографе Нобеяма (Япония) на волне 17.6 мм, убедительно показало, что на коротких миллиметровых волнах яркий источник над пятнами исчезает (Нагнибеда, Лукичева, 1998; Лукичева, Нагнибеда, 1999). Наблюдательное подтверждение этого эффекта было получено на интерферометрической системе ВМА (Berkeley-Illinois-Maryland Array, США) на волне 3.5 мм в 2003 году, когда были проведены уникальные наблюдения отдельных участков солнечного диска с угловым разрешением (10–12) угл. сек (Лукичева и др., 2006).

Очень интересные результаты были получены на РТ-22 ФИАН и КрАО при исследовании миллиметрового излучения волокон на диске Солнца и протуберанцев на лимбе, которые проводились совместно с сотрудниками Астрономического института Ленинградского (Санкт-Петербургского) университета. Еще У. Хангильдин обнаружил на волне 8 мм на РТ-22 ФИАН области пониженной радиояркости на солнечных картах, связанные с волокнами. Позднее на этом телескопе Г.П. Апушкинский и А.Н. Цыганов провели детальное изучение таких источников. Они построили усредненный спектр их излучения в миллиметровом диапазоне, сопоставили характеристики радио- и оптического изображений (Апушкинский, Цыганов, 1972). Надо признать, что диаграмма направленности РТ-22 (порядка 2 угл. мин) оказалась неподходящей для изучения таких специфических объектов – узких и протяженных структур.

Уникальные результаты были получены, когда по предложению Н.А. Топчило исследования протуберанцев, но уже на лимбе, были перенесены на РТ-22 КрАО. Они проводились с 1987 по 1993 гг. с активным участием Николая Семеновича Нестерова и при поддержке тогдашнего руководителя отдела А.В. Степанова. Спектрально-поляризационные наблюдения на волнах 8 и 13.5 мм позволили получить независимую оценку магнитных полей в спокойных протуберанцах. Решающим фактором в обеспечении высокой точности и достоверности измерений стало использование кругового сканирования для картографирования окололиimbusовых источников.

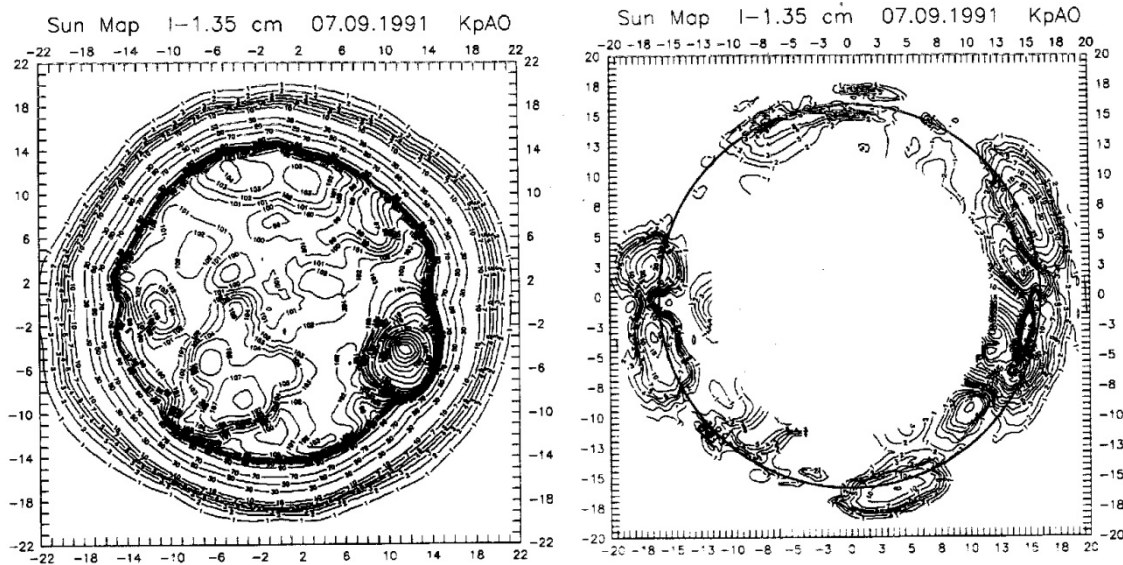


Рис. 7. Сравнение радиокарты Солнца, построенной растровым сканированием (слева), и карты около-лимбовой зоны, построенной круговым сканированием (справа) (из Топчило, 2007)

К сожалению, выполнение программы было прервано из-за общей разрухи 90-х годов и, позднее, кончины Н.С. Нестерова.

В своем докладе на конференции в КрАО, посвященном исследованию протуберанцев на РТ-22 КрАО, Н.А. Топчило отметил, что благодаря высокой чувствительности приемной аппаратуры и превосходной точности движения радиотелескопа удалось реализовать метод кругового сканирования, позволивший достичь для прилимбовых структур точности измерения круговой поляризации 0.003–0.005 % от уровня излучения спокойного Солнца в интенсивности при характерной в наблюдениях величине сигнала круговой поляризации от протуберанцев от 0.1 % до 0.01 %. Степень собственной круговой поляризации протуберанцев по наблюдениям составляла не более 1 %. Анализ измерений магнитного поля 24-х спокойных протуберанцев показал, что значения магнитного поля лежат, в основном, в диапазоне 0–30 Гс, а средний угол наклона поля к длинной оси протуберанца составляет около 13 градусов, что качественно и, в значительной мере, количественно совпадает с результатами статистических исследований, выполненных по измерениям в оптике. В итоге, выполненные в те годы на РТ-22 КрАО измерения до сих пор остаются наиболее полными, точными и достоверными оценками магнитных полей спокойных протуберанцев, полученными в радиодиапазоне (Топчило, 2007).

Миллиметровое излучение спокойного Солнца. Изначально понятие “спокойное Солнце” использовалось для калибровки измерений проявлений солнечной активности. Поэтому важной задачей было получение надежного спектра радиоизлучения спокойного Солнца в широком диапазоне длин волн. Для этого удобно было использовать малые радиотелескопы, измерявшие интегральный поток излучения и его вариации в течение длительных периодов времени. В нашей стране такие измерения были выполнены в НИРФИ под руководством В.С. Троицкого и М.М. Кобринина.

В 80-е годы была построена полуэмпирическая модель нижней атмосферы спокойного (невозмущенного) Солнца, известная под аббревиатурой VAL (Вернацца и др., 1981). Наблюдательной базой для нее послужили, в основном, данные об ультрафиолетовом спектре, получен-

ные американскими космическими обсерваториями OSO. Эта модель и ее последующие модификации (FAL, Фонтенла и др., 1993) получили широкое распространение и в настоящее время приняты как “классические” модели для описания стационарного состояния солнечной атмосферы. Однако есть ряд наблюдательных фактов, противоречащих этим моделям. С другой стороны, благодаря современным наблюдениям с высоким угловым и временным разрешением, стало очевидным, что хромосфера чрезвычайно динамична и неоднородна и сам факт возможности описания состояния солнечной атмосферы стационарной моделью был поставлен под сомнение. Альтернативным описанием является динамическая модель солнечной атмосферы. Первые такие одномерные модели были разработаны в работе (Карлссон и Штейн, 1995), часто обозначаемые как CS-модели. В дальнейшем, благодаря развитию компьютерных технологий стало возможным создание трехмерных моделей динамической солнечной атмосферы (например, Карлссон и др., 2016). В работах сотрудницы СПбГУ М.А. Лукичевой (Лукичева и др., 2004, 2006) было предложено использовать наблюдения солнечного радиоизлучения в коротковолновой части радиодиапазона (миллиметровые волны) для диагностики хромосферы и для тестирования стационарных и динамических моделей солнечной атмосферы. Были исследованы свойства миллиметрового радиоизлучения в динамической хромосфере спокойного Солнца, представленной одномерной динамической моделью CS, и получен вывод о высокой чувствительности излучения миллиметрового диапазона к динамическим процессам, связанным с распространением ударных волн в хромосфере.

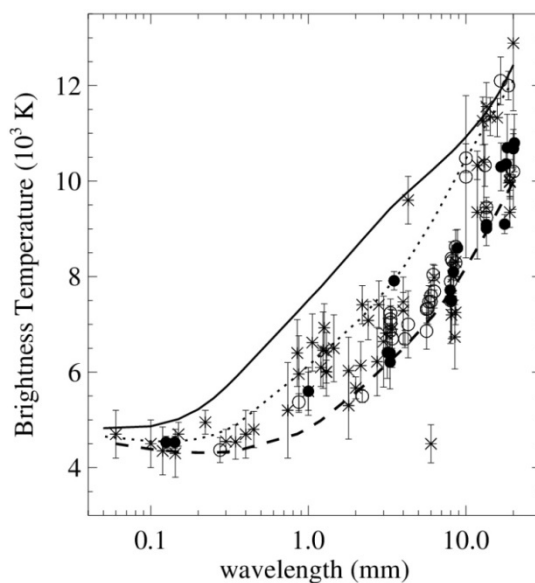


Рис. 8. Спектр спокойного Солнца в миллиметровом диапазоне. Символами обозначены данные наблюдений, полученные в разные фазы цикла солнечной активности, кривыми изображены модельные спектры для FAL A, C, F. Адаптировано из (Лукичева и др., 2004)

Было установлено, что колебания радиояркостности достигают наибольшей амплитуды в миллиметровом диапазоне, 0.8–5.0 мм, где их амплитуда (ок. 1000 К) достигает 15 % от уровня спокойного Солнца. При этом оказалось, что имеющийся набор наблюдательных данных радиояркостности спокойного Солнца в миллиметровом диапазоне с одинаковой степенью точности можно описать как комбинацией яркостных компонент одномерных стационарных моделей, так и динамической моделью, при этом стационарная модель, соответствующая “усредненному” состоянию атмосферы, приводит к завышенным значениям в миллиметровом диапазоне относительно наблюдаемых с невысоким угловым разрешением.

Еще одним параметром для проверки моделей хромосферы может служить радиорadius. Его значения на миллиметровых волнах измерялись в течение нескольких десятилетий во время затмений, в наблюдениях на крупных радиотелескопах и интерферометрах. В обзоре (Нагнибеда, Пиотрович, 1987), где собраны практически все опубликованные данные, хорошо видно, что на коротких волнах значения радиорadiusа лежат в пределах $(1.005-1.015) R$. Для этих волн величина радиорadiusа практически дает значение высоты (толщины) хромосферы. По-видимому, наиболее точное и достоверное значение радиорadiusа на волне 3 мм было получено в наблюдении затмения 11 июля 1991 года. На этой волне оно наблюдалось в трех местах, на разных инструментах и разными методами, и результат получился практически одинаков: высота хромосферы составила более 5000 км, что значительно превышает расчетное значение для VAL-моделей. Это обстоятельство стало предметом острой дискуссии и критики упомянутых моделей (см., например, Зирин, 1996).

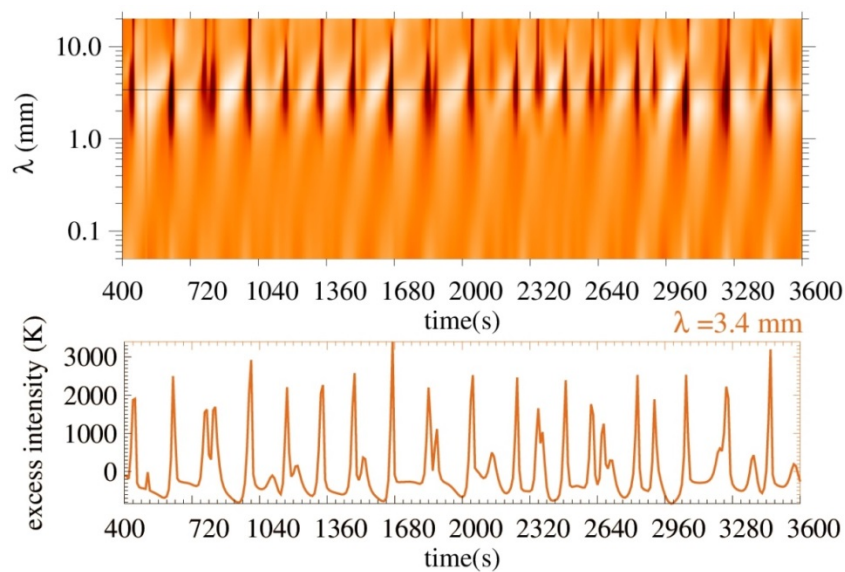


Рис. 9. Модельный динамический спектр радиояркости миллиметрового излучения, рассчитанный по одномерной динамической модели CS. Адаптировано из работы Лукичевой и др. (2004)

Тонкая структура и динамика хромосферы. Хромосферную природу миллиметрового радиоизлучения доказывает и обнаружение так называемой “радиогрануляции” – флуктуации сигнала при сканировании узкой диаграммой вдоль солнечного диска. Впервые такое явление было обнаружено на РТ-22 КраО на волне 8 мм при остроумном использовании прохождения Меркурия по диску Солнца 9 мая 1970 года. Размеры реальных структурных неоднородностей спокойного Солнца имели два характерных масштаба: $(1.6-3.4)$ угл. сек, размер групп гранул, и $(17-40)$ угл. сек, размер супергранул (Ефанов и др., 1975). Аналогичные результаты были получены позже на коротких волнах 1.4 и 4.1 мм на РТ-25 \times 2 (ножевая диаграмма направленности составляла 13 и 39 угл. сек) – характерный размер неоднородностей не более 1 угл. мин (Кисляков и др., 1975) и на волне 3.2 мм при наблюдении солнечного затмения 15.12.1982 года на РТ-7.5 МГТУ, с характерным размером 35 угл. сек и с контрастом 0.03 (Иванов и др., 1984).

Приведенные значения носят оценочный характер, поскольку в указанных наблюдениях значительным было влияние антенного сглаживания. Гораздо более детальную и убедительную картину удалось получить в уже упомянутых наблюдениях на системе ВІМА с двумерным разрешением 12 угл. сек. В ходе анализа наблюдений на волне 3.5 мм в работе (Уайт и др., 2006; Лукичева и др., 2006, 2009) были получены четкие свидетельства существования тонкострук-

Миллиметровое радиоизлучение Солнца...

турных образований в спокойной хромосфере на пространственных масштабах порядка $10''$, в большой степени совпадающих с хромосферной сеткой, видимой в линиях ионизованного кальция.

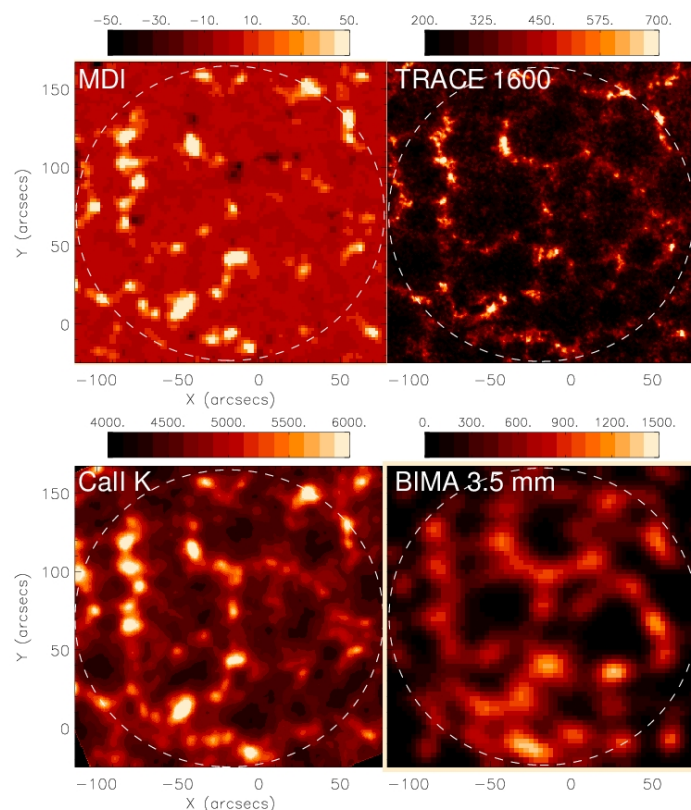


Рис. 10. Первые успешные интерферометрические наблюдения солнечной хромосферы на волне 3.5 мм (нижняя правая панель) вместе с фотосферной магнитограммой MDI SOHO (Michelson Doppler Interferometer on the Solar and Heliospheric Observatory) (верхняя левая панель), с УФ-изображением TRACE (Transition Region and Coronal Explorer) (верхняя правая панель) и изображением в линии ионизованного кальция, полученным в BBSO (Big Bear Solar Observatory) (нижняя левая панель). Адаптировано из работы (Лукичева и др., 2009)

Эти же наблюдения продемонстрировали и наличие квазипериодических колебаний (КПК) радиояркости в солнечном радиоизлучении. Первые работы по обнаружению и исследованию КПК на волнах сантиметрового диапазона начались в НИРФИ О.И. Юдиным в 1968 году под руководством М.М. Кобрин. В общем потоке солнечного излучения были найдены периоды в диапазоне от нескольких минут до десятков минут. Эти работы стимулировали поиск таких колебаний и в миллиметровом диапазоне. Сотрудники М.М. Кобрин использовали для этого РТ-22 ФИАН. Результаты наблюдений показали, что в миллиметровом диапазоне влияние флуктуаций земной атмосферы значительно и достоверно выявить КПК в излучении спокойных участков на Солнце практически невозможно. Но оказалось, что КПК в основном связаны с излучением активных областей. Это направление получило развитие. В настоящее время одним из энтузиастов изучения КПК в миллиметровом излучении активных областей является В.В. Смирнова, которая организовала наблюдения на РТ-7.5 МГТУ и РТ-14 в Метсахови (Финляндия). Главный интерес – поиск длиннопериодных колебаний радиояркости, которые, как

следует из теории, могут быть следствием механических колебаний солнечных пятен (Смирнова и др., 2013).

Исследование динамики хромосферной структуры в радиоизлучении спокойного Солнца, полученной в наблюдении на ВІМА, показало наличие квазипериодических колебаний радиояркости с характерными периодами 120–600 секунд и амплитудой, не превышающей 5 % от радиояркости спокойного Солнца. Сопоставление наблюдаемых колебаний яркостной температуры с теоретическими оценками вариаций радиояркости, сделанными на основе одномерной модели CS, указывает, что наилучшее согласие между наблюдениями и модельными расчетами достигается при предположении, что осциллирующие элементы имеют масштаб когерентности порядка одной угловой секунды (Лукичева и др., 2006).

Заключение

В солнечной физике в целом, а особенно в изучении хромосферы, в последние 10–15 лет произошли радикальные изменения, связанные с появлением новых оптических солнечных телескопов, дающих угловое разрешение до 0.1 угл. сек: SST (Swedish Solar Telescope), DOT (Dutch Open Telescope), NST (New Solar Telescope BBSO), а в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах – космических аппаратов IRIS (Interface Region Imaging Spectrograph), SDO (Solar Dynamics Observatory) и других. До настоящего времени полноценно использовать наблюдения радиодиапазона на мм-субмм волнах для исследования хромосферы представлялось затруднительным в первую очередь по причине малочисленности самих инструментов и солнечных наблюдений. Для решения современных проблем физики солнечной хромосферы, к которым относятся вопросы тонкой структуры хромосферных слоев, магнитографии хромосферы, природы нагрева хромосферы и короны, масштабы, на которых происходит энерговыделение, а также способы переноса энергии в корону, необходимы многоволновые наблюдения в мм-субмм диапазоне с секундным и субсекундным угловым разрешением, а также с высоким временным разрешением. В этой связи только с радиоинтерферометром нового поколения Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array (ALMA) становится возможным полноценное использование миллиметровых наблюдений для изучения солнечной хромосферы (Лукичева и др., 2008, 2014). Угловое и временное разрешение системы (составляющее сотые доли угловой секунды для самых протяженных конфигураций), а также чувствительность инструмента, на порядки величины превосходят характеристики других немногочисленных инструментов данного диапазона. Первые регулярные солнечные наблюдения спокойного Солнца и активных областей на системе ALMA состоятся в декабре 2016 года (четвертый цикл наблюдений), а значит, в самое ближайшее время можно ожидать новых результатов о строении солнечной хромосферы.

Работа частично поддержана грантом РФФИ (проект № 16-02-00749).

Литература

- Апушкинский Г.П., Цыганов А.Н. // Солнечные данные. 1972. № 8. С. 100.
Вальдмайер, Мюллер (Waldmeier M., Mueller H.) // Zrschr. Aph. 1950. V. 27. P. 58.
Вернацца и др. (Vernazza J.E., Avrett E.H., Loeser R.) // Astrophys. J. Suppl. Ser. 1981. V. 45. P. 635.
Ефанов В.А., Кисляков А.Г., Лебский Ю.В., Моисеев И.Г., Наумов А.И. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1972. Т. 44. С. 137.
Ефанов В.А., Куликов Ю.Ю., Моисеев И.Г., Федосеев Л.И. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1973. Т. 48. С. 93.
Ефанов В.А., Моисеев И.Г., Северный А.Б. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1975. Т. 53. С. 121.

Миллиметровое радиоизлучение Солнца...

- Железняков В.В. // Астрон. журн. 1962. Т. 39. С. 5.
- Зирин (Zirin H.) // Solar Phys. 1996. V. 169. P. 313.
- Иванов В.Н., Нагнибеда В.Г., Пиотрович В.В., Розанов Б.А., Соловьев Г.Н. // XVI Всесоюзная конференция по радиоастрономическим исследованиям солнечной системы. Звенигород. 1984. С. 19.
- Карлссон, Штейн (Carlsson M., Stein R.F.) // Astrophys. J. 1995. V. 440. P. L29.
- Карлссон и др. (Carlsson M., Hansteen V.H., Gudiksen B.V., Leenaart J., De Pontieu B.) // Astron. Astrophys. 2016. V. 585. P. A4.
- Кисляков А.Г., Куликов Ю.Ю., Федосеев Л.И., Чернышев В.И. // Письма в Астрон. журн. 1975. Т. 1. С. 24.
- Корольков Д.В., Соболева Н.С. // Астрон. журн. 1961. Т. 38. С. 647.
- Лукичева, Нагнибеда (Loukitcheva M.A., Nagnibeda V.G.) // Proc. 8th SOHO Workshop. ESA SP-446. 1999. P. 451.
- Лукичева и др. (Loukitcheva M., Solanki S.K., Carlsson M., Stein R.F.) // Astron. Astrophys. 2004. V. 419. P. 747.
- Лукичева и др. (Loukitcheva M.A., Solanki S.K., White S.) // Astron. Astrophys. 2006. V. 456. P. 713.
- Лукичева и др. (Loukitcheva M.A., Solanki S.K., White S.) // Astrophys. Space Sci. 2008. V. 213. P. 197.
- Лукичева и др. (Loukitcheva M., Solanki S.K., White S.) // Astron. Astrophys. 2009. V. 497. P. 273.
- Лукичева и др. (Loukitcheva M.A., Solanki S.K., White S.) // Astron. Astrophys. 2014. V. 561. P. 133.
- Молчанов А.П. // Астрон. журн. 1961. Т. 38. С. 849.
- Нагнибеда В.Г. // Труды Астрон. обсерв. Ленингр. ун-та. 1977. Т. 33. С. 38.
- Нагнибеда В.Г., Пиотрович В.В. // Труды Астрон. обсерв. Ленингр. ун-та. 1987. Т. 41. С. 5.
- Нагнибеда, Лукичева (Nagnibeda V.G., Loukitcheva M.A.) // JOSO Annual Rept. 1998. P. 99.
- Саломонович А.Е. // Астрон. журн. 1962. Т. 39. С. 260.
- Смирнова и др. (Smirnova V., Riehoainen A., Solov'ev A., Kallunki J., Zhiltsov A., Ryzhov V.) // Astron. Astrophys. 2013. V. 552. P. A23.
- Топчило Н.А. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2007. Т. 103. С. 222.
- Уайт и др. (White S., Loukitcheva M.A., Solanki S.K.) // Astron. Astrophys. 2006. V. 456. P. 697.
- Фонтенла и др. (Fontenla J.M., Avrett E.H., Loeser R.) // Astrophys. J. 1993. V. 406. P. 319.
- Хангильдин У.В. // Астрон. журн. 1964. Т. 41. С. 302.
- Юровский Ю.Ф. // Интернет-публикация 2004. http://kik-sssr.ru/41E.2_Yurovski.htm