

УДК 520.22

Основные результаты исследований, полученные в лаборатории радиоастрономии НИИ “КрАО”

Л.И. Цветков

НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный

Поступила в редакцию 30 сентября 2008 г.

Исследование Солнца на РТ-22

Измерение радиодиаметра Солнца, распределение интенсивности радиоизлучения по его диску и ее зависимость от длины волны дают ценную информацию о строении солнечной атмосферы. Высокая разрешающая способность радиотелескопа на коротких сантиметровых волнах позволила проследить изменение радиодиаметра Солнца с фазой цикла солнечной активности (А.Ф. Бачурин, И.Г. Моисеев, Н.С. Нестеров, Ю.Ф. Юровский).

Обнаружена повышенная яркость полярных областей Солнца в миллиметровом диапазоне. Выявлено, что повышенная (на 10–15 процентов) температура полюсов Солнца является неизменным атрибутом солнечной активности, она существует вблизи минимума и отсутствует вблизи максимума 11-летнего цикла (И.Г. Моисеев, Н.С. Нестеров).

Был предпринят поиск грануляции Солнца в радиодиапазоне, подобной той, которая наблюдается в видимой области излучения. Первое обнаружение радиогрануляции было сделано на РТ-22 9.05.1970 г. на волне 8 мм при прохождении Меркурия по диску Солнца (В.А. Ефанов, И.Г. Моисеев, А.Б. Северный).

Исследована пространственно-временная структура солнечных активных областей и всплесков по наблюдениям в миллиметровом и сантиметровом диапазонах радиоизлучения:

- определены размеры и спектры радиоизлучения локальных источников в диапазоне 1.9–3.5 см;
- обнаружена радиогрануляция на волне 3.3 мм;
- изучена тонкая временная структура микроволновых всплесков;
- обнаружена инверсия знака поляризации радиоизлучения всплесков;
- определены параметры эруптивной вспышечной плазмы;
- выполнены оценки интегрального магнитного поля в нижней короне Солнца;
- выработаны определенные критерии для диагностики гелиоактивности (Н.В. Баранов, А.Д. Гранат, Н.Н. Ерюшев, А.В. Степанов, Л.И. Цветков, наблюдения на 3.3 мм совместно с ИПФАН, г. Н. Новгород).

В рамках научного направления “гелиосейсмология” были предприняты попытки обнаружения глобальных колебаний Солнца по радиоданным. Результаты многолетних наблюдений на РТ-22 в сантиметровом диапазоне достоверно свидетельствуют об обнаружении колебаний радиояркости спокойного Солнца в интервале g-мод глобальных осцилляций Солнца, пульсаций радиоизлучения корональных дыр диапазона f-мод и флуктуаций радиоизлучения

активных областей, относящихся к интервалу p -мод солнечных осцилляций (Н.Н. Ерюшев, В.А. Котов, А.Б. Северный, Л.И. Цветков, В.И. Ханейчук).

Совместные (КрАО-НИРФИ) наблюдения Солнца, проведенные в 1977–1989 гг. на радиотелескопе РТ-22 КрАО с высоким спектральным (~ 100 МГц) и временным (~ 12 мсек) разрешением в диапазоне 8–17 ГГц, позволили получить следующие результаты: а) обнаружена многомодовость пятиминутных колебаний радиоизлучения с расщеплением ($n \times 68$ мкГц); б) установлено наличие характерных микроволновых предвестников типа “ступенька” у всплесков слабой и средней интенсивности; в) получены подтверждения плазменного механизма радиоизлучения некоторых микроволновых всплесков, содержащих дрейфующую узкополосную (2–3 ГГц) компоненту (М.А. Миронов, Л.И. Цветков совместно с НИРФИ, г. Н. Новгород).

По наблюдениям солнечных затмений на РТ-22 в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн определена структура активных областей, связанных с группами пятен и порами. Оценены размеры локальных источников в атмосфере Солнца, магнитные поля и яркостные температуры. По эффектам рефракции радиоволн в околосолнечной плазме определены ее параметры.

Впервые при наблюдениях затмений применен разностный метод выделения локальных источников, позволивший уточнить высоту расположения излучающего слоя, подтвердить трехкомпонентную структуру источника и обнаружить ее сохранение в течение 1–3 суток после распада группы пятен (И.А. Будзиновская, Н.Н. Ерюшев, В.А. Ефанов, И.Г. Моисеев, Л.И. Цветков, Ю.Ф. Юровский).

По наблюдениям на волнах вблизи 1 см более 30 активных областей на Солнце и всплесков радиоизлучения в них показано, что в переходном между хромосферой и короной слое в активных областях иногда существует магнитное поле в 2.5 кГс. Обнаружена тесная корреляция между формами спектров радиоизлучения активных областей и всплесков, происходящих в них, а параметры радиоизлучения активных областей связаны с напряженностью магнитного поля в пятнах (И.Г. Моисеев, Н.С. Нестеров).

В результате анализа данных о радио- и рентгеновских всплесках на Солнце показано, что для оптически тонких тепловых радиовсплесков (спектральный индекс 0) выполняется соотношение между рентгеновской светимостью L_x и радиопотоком $Fr \log(L_x/Fr) = 10E16$. Оно близко к ожидаемому теоретическому, а также выполняется для звездных корон в широком интервале спектральных классов (Н.С. Нестеров, И.Г. Моисеев, А.В. Степанов).

На основе наблюдательных данных, полученных на РТ-22 НИИ “КрАО”, исследованы квазипериодические вариации микроволнового излучения активных областей Солнца с периодами $T < 10$ мин. Как следует из вейвлет-анализа, в динамических спектрах мощности наибольшими амплитудами обладают колебания с периодами 3–5 мин. и 10–40 сек., в то время как осцилляции с $T < 10$ сек. практически отсутствуют. Проведенный анализ показал, что вследствие теплопроводных потерь акустические моды с $T < 1$ мин. подвержены сильной диссипации в нижней короне Солнца. Колебания с $T = 10–40$ сек., по-видимому, связаны с альвеновскими возмущениями. В рамках однородной модели проведен анализ влияния акустических и альвеновских осцилляций на тепловые механизмы микроволнового излучения. Сделан вывод, что за высокую температуру солнечной короны ответственны альвеновские волны (Ю.Т. Цап, Л.И. Цветков, Ю.Ф. Юровский, И.А. Будзиновская совместно с ГАО РАН).

На основе наблюдательных данных, полученных с помощью РТ-22 КрАО, рассмотрены особенности микроволнового излучения солнечной вспышки 14 июля 2000 г. В ходе вспышечного энерговыделения на всех частотных каналах (8.6, 13.3 и 15.4 ГГц) обнаружена смена знака круговой поляризации. Из сопоставления с наблюдениями в ультрафиолетовом (TRACE) и жестком рентгеновском (Yohkoh) диапазоне показано, что смена знака поляризации произошла вследствие смещения источника ускоренных частиц из западной части активной области в восточную. Наблюдаемое несоответствие между поведением временных профилей потоков

жесткого рентгеновского и микроволнового излучения объясняется особенностями распространения электронов в корональных арках (Ю.Т. Цап, Л.И. Цветков совместно с ГАО РАН).

На основе уравнений квазилинейной диффузии исследовано стационарное состояние взаимодействующих со свистами энергичных (20–300 кэВ) электронов в корональных арках на Солнце. Показано, что не кулоновские соударения, а свисты оказывают доминирующее влияние на спектр быстрых электронов в корональных арках с температурой $<10^7$ К, магнитным полем <500 Гс и концентрацией плазмы $<10^{12}$ см⁻³. Установлено, что затухание Ландау свистов преобладает над столкновительным и нелинейным. Определены характерные значения плотности энергии свистов во вспышечных петлях. Найдены соотношения для плотности потоков и спектров жесткого рентгеновского излучения в основаниях и в корональной части вспышечной петли при постоянном показателе спектра источника. Наблюдаемый излом спектра микроволнового излучения вспышек объясняется изменением режимов диффузии захваченных электронов в конус потерь (Ю.Т. Цап, А.В. Степанов).

Изучены временные характеристики и пространственные особенности 4-х локальных источников радиоизлучения, которые располагались в короне над активными областями Солнца. Использованы наблюдения в микроволновом и дециметровом диапазоне (2–20 см), проведенные в сентябре-октябре 2002 г. на радиотелескопах РТ-22 (НИИ “КрАО”), РАТАН-600 (САО РАН) и ССРТ (СибИЗМИРАН). Рассмотрена структура и динамика локальных источников, а также их связь с квазипериодическими процессами в атмосфере Солнца. Вейвлет-анализ вариаций радиоизлучения активной области NOAA 0139 позволил установить, что колебания с периодом около 17 и 30 мин. запаздывают на волне 3.5 см относительно колебаний на волне 2.0 см. Такое запаздывание характерно для распространяющихся в солнечной атмосфере акустических волн (Л.И. Цветков, Ю.Т. Цап, Ю.Ф. Юровский совместно с ГАО РАН, ИСЗФ СО РАН, СПбФ САО РАН).

Исследования звезд и галактик

Проведен обзор северного полушария неба на волне 3.5 см, около 30 % наблюдавшихся при обзоре источников радиоизлучения были обнаружены впервые. Проведены обзоры на миллиметровых волнах источников радиоизлучения в северной полусфере неба, обнаруженных на см волнах; определены спектры их излучений вплоть до мм волн (В.А. Ефанов, И.Г. Моисеев, Н.С. Нестеров совместно с ГАИШ).

Начиная с 1973 года прослежена переменность миллиметрового излучения нескольких сотен АЯГ. Наблюдения выборки внегалактических источников дали возможность исследовать переменность излучения этих объектов в миллиметровом диапазоне длин волн, а также получить амплитуды и моменты максимумов вспышек радиоизлучения. Полученная база данных переменности активных ядер галактик в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн является практически единственной в мире. Анализ данных показал, что все типы АЯГ должны иметь одинаковую структуру – ядро + джет (выброс), направленный под малым углом к наблюдателю. Определено, что для любого источника в зависимости от его структуры и типа активности есть свой “сценарий” развития событий от высоких к низким частотам. Определены величины амплитуд и моменты максимумов всплесков. Развитие всплесков может быть разделено на 3 фазы: а) быстрое возрастание потока; б) плато, когда поток относительно постоянен; в) медленное падение интенсивности. Распределение источников в зависимости от количества всплесков за определенный интервал времени не показывает деления их на отдельные группы. Моделью всплесков является модель, согласно которой всплески излучения компактных внегалактических источников возникают в результате прохождения ударной волны от ядра вдоль струи релятивистской плазмы, направленной к наблюдателю. Показатель распределения электронов по энергиям $\gamma = 1.4$ универсален для постоянных и всплесковых компонентов. По-видимому, в различном состоянии все переменные радиоисточники содержат

как быструю, так и медленную составляющие переменного излучения. Это соотношение зависит при прочих равных условиях от пространственной ориентации объекта (И.Г. Моисеев, Н.С. Нестеров, А.Е. Вольвач, И.Д. Стрепка совместно с Хельсинским технологическим университетом Финляндии).

Проведено сопоставление данных переменности потоков внегалактических радиоисточников по результатам мониторинга на миллиметровых и метровых волнах с учетом времени запаздывания. Зарегистрировано, что в зависимости от структуры и типа активности существует свой “сценарий” развития событий от высоких частот к низким: а) запаздывание в изменении потоков источников в пределах 2 лет; б) квазисинхронные изменения потоков; в) независимые проявления активности источников, когда усиление потока на низких частотах связано с мерцанием источников на неоднородности ионизированной составляющей межзвездной среды (А.Е. Вольвач совместно с Одесским отделением РИ НАНУ).

Проведен анализ результатов интенсивных наблюдений галактики NGC 1275, выполненных на радиочастотах, а также в оптическом диапазоне. Выявлены два типа излучения континуума ядра галактики. Первый – это всплески, происходящие на радиочастотах примерно через 6 лет после соответствующих оптических событий. Они соответствуют выбросам новых РСДБ-компонентов из ядра. Второй тип вариаций обусловлен медленными изменениями, имеющими задержку около 8 лет между оптическим и радиодиапазонами. Экстраполяция расширения этих двух компонентов показывает, что истинное ядро галактики расположено на расстоянии в несколько парсек от радиоядра (начала видимого радиоджета) (Н.С. Нестеров).

Проведены исследования квазара с большим красным смещением 0642+449 (ОН471) за период 30 лет в диапазоне частот 0.325–90 ГГц и зарегистрирована переменность двухкомпонентного спектра с максимумами на частотах около 1 и 20 ГГц. Полученные данные о переменности квазара ОН 471 на частотах 22 и 36 ГГц свидетельствуют о том, что этот источник является одним из самых мощных среди известных квазаров в миллиметровом диапазоне волн. Выявлена переменность радиоизлучения квазара на низких частотах. Проведены исследования тонкой структуры квазара ОН 471 на частотах 325 МГц, 1.6, 2, 5, 15, 24 и 43 ГГц. Зарегистрирована структура радиоисточника ОН 471: ядро-джет с джетом, вытянутым на восток на расстояние около 5 мсек. Скорость выброса компоненты составила 15–20 скоростей света. Обнаружен близкий радиоисточник фона с крутым спектром, отстоящий на 2.5' к северу от квазара ОН 471 с потоком 1.45 мЯн на частоте 5 ГГц и 14.5 мЯн на частоте 350 МГц (Н.С. Нестеров, А.Е. Вольвач).

По данным систематических наблюдений с высоким частотным разрешением областей мазерного излучения изучены процессы, которые происходят в областях зарождения линий и приводят к вспышкам излучения. Проведены исследования переменности потока, ширины и формы одиночных деталей линий мазерных источников в линиях молекул водяного пара H_2O и гидроксидила OH , а также наблюдения молекулярных линий, существующих в областях Галактики, в диапазоне 85–90 ГГц. Получены данные о спектрах и поляризационных свойствах мазерных источников. Исследована сверхтонкая структура областей звездообразования W3(OH), W49N, W51M, W51A, CepA, Орион КЛ, W33A в линиях OH и H_2O с угловым разрешением несколько миллисекунд дуги. Определены линейные размеры и яркостные температуры компонент. Определена пространственная структура вспышки H_2O мазерного излучения в Орионе КЛ в эпоху 1982.9 по данным радиоинтерферометрических наблюдений. Область излучения состоит из трех групп компонент. Угловые размеры компонент – 0.2–0.9 мсек. дуги, ширины излучаемых линий лежат в пределах 0.2–0.7 км/с. Наблюдается корреляция скоростей компонент с их относительными положениями, которая соответствует расширяющимся концентрическим кольцам: радиус внутреннего кольца равен $R = 15$ а. е., скорость его вращения $V_{rot} = 9$ км/с, радиальная составляющая скорости $V_{rad} = 1.8$ км/с; для внешнего кольца $R = 15.7$ а. е., $V_{rot} = 8.8$ км/с, $V_{rad} = 2.6$ км/с (В.А. Ефа-

нов, И.Г. Моисеев, Н.С. Нестеров, А.Е. Вольвач, И.Д. Стрепка, Л.Н. Вольвач совместно с ИКИ РАН, ИПФ РАН, РИ НАНУ).

Проведены спектральные исследования молекулярного космического излучения на частотах 85–115 ГГц. Проведен обзор свыше 100 молекулярных облаков, связанных с областями H II в линии $J = 1-0$ HCN. Проведен обзор источников ИК-излучения во внешней Галактике. Определено, что средняя плотность газа в конденсациях, связанных с мазерами H₂O, убывает с удалением от центра Галактики. В интервале галактоцентрических расстояний $R = 7 \div 14$ кпк изменение средней плотности может быть описано экспоненциальным законом с характерным масштабом порядка 3 кпк (И.Г. Моисеев, Н.С. Нестеров, В.М. Шульга, А.Е. Вольвач совместно с ИПФ РАН, РИ НАНУ).

Получены спектры около 100 радиисточников на частотах 2.3, 5 и 8.4 ГГц для наземно-космической программы “Радиоастрон”. Подготовлен каталог радиисточников с возрастающими в сторону высоких частот потоками: 1250 объектов северного неба на уровне потока 0.2–0.3 Ян. Получены спектры объектов в широком диапазоне частот от 0.3 до 36 ГГц (А.Е. Вольвач, И.Д. Стрепка, Л.Н. Вольвач совместно с АКЦ ФИ РАН).