

Тема 3.3: «Исследование природы источников космического радиоизлучения в широком диапазоне волн»

Отчет за 2024 год

Руководитель: Е.Е.Лехт

Исполнители: Н.Т.Ашимбаева, И.А.Биленко и Л.С.Уголькова

РЕФЕРАТ

Работа по теме посвящена изучению источников космического излучения различных классов: Солнца (радиоизлучение Солнца), мазерных источников водяного пара (H_2O) и гидроксила (OH), связанных с областями активного звездообразования, и внегалактических источников: блазара 3C 454.3, сейфертовской галактики NGC 7469 и лацертиды BL Lac. Общим для всех объектов темы был поиск переменности излучения временных масштабов от нескольких часов до десятков лет (продолжение многолетнего мониторинга) в широком диапазоне длин волн. Также большое внимание было уделено исследованию структуры и эволюции магнитного поля и сильных вспышек излучения и их природы. Основную роль в формировании корональных выбросов массы (КВМ) и радио всплесков II типа (РВII) и в их распространении играют солнечные магнитные поля различных временных и пространственных масштабов. Также были проведены исследования природы долговременных вариаций мазерного излучения, структуры и эволюции околозвездной среды в областях звездообразования. Обнаружена корреляция переменности параметров Стокса с переменностью плотности потока мазерного излучения гидроксила для объектов Сер А, S128, S255 IR, W51 и W75N. Была измерена величина монотонного уменьшения зеемановского расщепления и, следовательно, продольного магнитного поля трех зеемановских пар в источнике Сер А.

Наблюдения мазерных источников были выполнены на волне 1.35 см на радиотелескопе РТ-22 в Пушино и на волне 18 см на Большом радиотелескопе в Нансэ (Франция). Данные излучения блазара 3C454.3, полученные ранее в рамках проекта SMARTS, дополнены данными телескопов CrAO, Пулковской обсерватории и приборов SAI (AZT-8, LX-200 и AZT-5), и сопоставлены с данными гамма-излучения, полученными с помощью прибора Fermi Gamma-ray.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

1. Радиоизлучение Солнца (И.А.Биленко)

Корональные выбросы массы (КВМ) являются одним из главных источников возмущений в межпланетной среде и важнейшим фактором в формировании космической погоды. Известно их большое влияние на техно- и биосферу. Воздействие КВМ на земную магнитосферу влияет и на геомагнитную активность. Наиболее геоэффективными оказываются КВМ сопровождающиеся радио всплесками II типа (РВII). Для прогнозирования космической погоды и минимизации возможных последствий используются различные модели определения времени распространения КВМ и характера возможных возмущений. Для их построения необходимы точные оперативные данные о времени прихода и степени воздействия КВМ. Однако в настоящее время закономерности формирования и КВМ, и РВII остаются до конца не выясненными, как и не известен точный характер их распространения и взаимодействия с другими явлениями солнечной активности. Это не позволяет создавать точные оперативные прогнозы космической погоды и геомагнитной активности. Основную роль в формировании КВМ и РВII и в их распространении играют солнечные магнитные поля различных временных

и пространственных масштабов. Поэтому в 2024 году были продолжены работы по анализу солнечных магнитных полей и зависимостей параметров KBM и РВП от топологии структуры и величины напряженности полей на разных фазах солнечной активности.

На основе данных магнитных полей наземных: WSO (Wilcox Solar Observatory) и Kitt-Peak KPVT (Kitt Peak Vacuum Telescope) и SOLIS/VSM (Synoptic Optical Long-Term Investigations/Vector Stokes Magnetograph) и космических: SOHO/MDI (Solar and Heliospheric Observatory/Michelson Doppler Imager) и SDO/HMI (Solar Dynamics Observatory/Helioseismic and Magnetic Imager) обсерваторий рассмотрены характеристики меридиональных циркуляций солнечных магнитных полей разного масштаба в 21 – 25 циклах. В качестве индекса активности локальных магнитных полей использовались числа Вольфа, полученные из базы данных SILSO (Sunspot Index and Long-term Solar Observations), мирового центра данных по созданию, хранению и распространению значений международных чисел солнечных пятен. Числа Вольфа являются синтетическим индексом. Они дают обобщенную информацию об изменении магнитных полей высокой напряженности, а именно полей солнечных пятен в циклах солнечной активности. В отличие от чисел Вольфа солнечное радиоизлучение на длине волны 10.7 см (2800 МГц) является реальной физической величиной, которая является характеристикой локальных магнитных полей, включающих магнитные поля площадей активных областей и фотосферных факельных площадок.

Результаты свидетельствуют о том, что в зависимости от напряженности фотосферного магнитного поля могут быть выделены три типа динамики магнитных полей. Первый – это динамика магнитных полей низкой напряженности. Они распределены равномерно по диску Солнца и изменения величины их напряженности не зависят от циклических вариаций магнитных полей активных областей. Второй – магнитные поля средней напряженности. Их меридиональная циркуляция представляет собой противофазную миграцию магнитных полей положительной и отрицательной полярности от одного полюса к противоположному в каждом цикле с периодом порядка 22 лет. Они характеризуют динамику глобального магнитного поля (ГМП) Солнца и определяют процесс смены знака магнитного поля на полюсах в максимумах солнечной активности. К третьему типу относятся локальные магнитные поля высокой напряженности активных областей. Показано, что магнитные потоки этого типа соответствующие как полярности лидирующих, так и хвостовых пятен мигрируют от высоких широт к низким симметрично в обоих полушариях Солнца с периодом около 11 лет. Все эти потоки не являются непрерывными потоками вещества на поверхности Солнца, а являются проявлением динамики униполярных областей трассируемых корональными дырами и зон формирования активных областей во внутренних слоях Солнца, отражающих динамику полоидальной и тороидальной компонент ГМП. Взаимодействие разнонаправленных потоков магнитных полей средней и высокой напряженности приводит к изменениям структуры ГМП, перераспределению магнитных полей положительной и отрицательной полярности по широте и долготе, формированию секторной структуры ГМП на фазах роста, максимума и спада, зональной в минимуме и к смене знака магнитного поля на полюсах Солнца в максимуме солнечной активности.

Проанализированы зависимости параметров KBM различных типов от топологии структуры и напряженности ГМП на разных фазах солнечной активности и их динамика в ходе циклов. По параметрам KBM сопровождающихся РВП рассчитаны характеристики межпланетной плазмы в областях их распространения и построены зависимости их вариаций в ходе циклов солнечной активности. Полученные результаты сопоставлены с существующими прогностическими моделями.

II. Космические мазерные радиисточники (Н.Т. Ашимбаева, Е.Е. Лехт)

1. Продолжен мониторинг источников мазерного излучения в линии водяного пара на 1.35 см на 22-м радиотелескопе в Пушино с регулярностью около одного сеанса в месяц и в линиях гидроксила на 18 см на Большом радиотелескопе в Нансэ (Франция). Как и в прошлые годы наблюдались порядка 140 источников, связанных с областями активного звездообразования (биполярные потоки и компактные и сверхкомпактные области III) и звездами поздних спектральных классов (мириды, полуправильные переменные, гиганты, сверхгиганты). Основное внимание в 2024 году было уделено исследованию объектов, связанных с областями активного звездообразования. Упор был сделан на исследование природы высокой вспышечной активности и долгопериодической переменности мазеров H₂O и исследованию переменности параметров Стокса в мазерах OH и, следовательно, исследованию магнитного поля и его эволюции в источниках: Сер А, S128, S255 IR, W51 и W75N. Как всегда для отождествления спектральных деталей с мазерными конденсациями использовались опубликованные VLA карты областей в линиях 1.35 см (H₂O) и 18 см (OH) с высоким угловым разрешением.

2. В отчете 2023 года мы отмечали, что в источнике S255 IR в 2023 г. спектр OH сильно изменился как в круговых поляризациях, так и в линейной поляризации. Также в 2023 г. были обнаружены самые сильные вспышки мазера H₂O за все время нашего мониторинга. Был сделан вывод о том, что вспышки и существенные изменения структуры спектров могут быть связаны с очередными вспышками аккреции вещества и появлением новых радиоджетов после известной вспышки в 2015 г. Возобновлен анализ полного каталога спектров H₂O с 1981 года для выявления вспышек, которые могут быть связаны с более ранними вспышками аккреции в S255 IR до 2015 года.

3. Кроме обычной переменности мазерного излучения были получены также весьма необычные результаты в области звездообразования Сер А. Мазерное излучение OH сильно переменное. Меняются структура спектра и плотность потока отдельных деталей. Однако, лучевые скорости большинства деталей менялись незначительно. Наблюдались кратковременные вспышки излучения отдельных деталей. Получено, что для большинства деталей имеется сильная круговая поляризация, достигающая 100%, но слабая линейная поляризация. В линии 1667 МГц обнаружена новая деталь на скорости -15.53 км/с и кратковременная деталь на скорости 1.58 км/с с высокой круговой и низкой линейной поляризациями. Все детали спектра OH, зарегистрированные в нашем мониторинге, были отождествлены с мазерными пятнами на картах Коэн и др., Аргон и др. и Фиш и др. Была измерена величина монотонного уменьшения зеемановского расщепления и, следовательно, продольного магнитного поля трех зеемановских пар ($-16.2L / -14.25R$ и $-6.94L / -0.82R$ км/с в линии 1665 МГц и $-15.76L / -14.2R$ км/с в линии 1667 МГц). Таким образом, с учетом наблюдений до нашего мониторинга, в мазерном пятне наблюдается систематическое уменьшение продольного магнитного поля на протяжении более 40 лет, причем с одинаковым темпом. Кроме этого во всех исследуемых мазерных пятнах в обеих главных линиях OH также наблюдалось уменьшение расщепления и, как следствие, уменьшение продольного магнитного поля. Это происходит из-за расширения молекулярного газа, окружающего молодую звезду.

Обнаружены коррелированные уменьшения потоков в зеркальных профилях спутниковых линий OH 1612 и 1720 МГц и потоков зеемановской пары $-9.15L / -8.70R$ км/с. Это может быть связано с изменением накачки уровней соответствующих переходов в ИК-источнике. Кроме того была вычислена величина позиционного угла для линейно поляризованного излучения большинства

спектральных деталей в обеих главных линиях 1665 и 1667 МГц. На основании этого сделан вывод, что магнитное поле в Сер А в областях Н II ориентировано либо вдоль внешнего магнитного поля, либо вдоль радио джетов.

4. Важные результаты получены при мониторинге мазера H₂O в направлении источника S128 в течение 1981–2024 гг. Источник необычен тем, что причиной звездообразования является столкновение двух молекулярных облаков CO. Мазеры водяного пара связаны с ионизационным фронтом на границе столкновения облаков, а не с конкретными звездными объектами. Эволюция спектров H₂O нашего мониторинга представлена в виде трехмерного 3D-изображения. Получено, что в интервале времени 2004–2006 гг. активность мазерного излучения H₂O постепенно перешла от мазера В к мазеру А. Активная фаза мазеров В и А продолжалась около 23 и 16 лет соответственно. Предполагается, что общей причиной переменности мазерного излучения обоих источников (А и В) являются ударные волны, возникающие вблизи ионизационного фронта. При столкновении облаков вдоль такого фронта распространяется возмущение, которое вызывает возникновение ударных волн. Согласно результатам нашего мониторинга распространение возмущения происходит в направлении юг–север. В настоящее время циклы высокой активности мазеров водяного пара источников В и А прошли. Все это подтверждает результаты наблюдений Bohigas и Tapia. Согласно им процесс звездообразования происходит в том же направлении; т.е. на юге области S128 находятся более старые звезды, а на севере области более молодые.

5. Большое значение мы придаем мониторингу мазерного излучения H₂O и OH в направлении области W51. Область W51 является одним из самых массивных гигантских молекулярных облаков в Галактике. Имеет очень сложную иерархическую структуру. Имеются две гигантские области HII: W51A и W51B. В свою очередь эти области распадаются на более мелкие источники -- компактные (CHII) и сверхкомпактные (UCHII) области ионизованного водорода. Эти области содержат массивные молодые звездные объекты, находящиеся на различных стадиях эволюции. Мазерное излучение OH имеет высокую степень круговой поляризации, но практически не имеет линейной поляризации. Это объясняется тем, что в данном случае имеется значительное фарадеевское вращение по длине усиления, которое подавляет усиление р-компонентов и приводит к круговым sigma-компонентам, поляризованным в противном случае эллиптически. Отметим, что при малом фарадеевском вращении (например, в источнике W75N, которому мы посвятили большое число исследований) мазерное излучение OH может иметь значительную степень, как круговой, так и линейной поляризации. Наши наблюдения, выполненные в Нансэ в течение двух лет, показали, что в линии 1665 МГц имеется слабая, до 3.5% линейная поляризация излучения в трех сильных деталях (в мазерных конденсациях). Причем, имеется повторяемость результатов, что свидетельствует о реальной поляризации излучения. Важно обнаружить переменность степени линейной поляризации, что подтвердит наши результаты. Проведена частичная обработка спектров OH в W75N. Статьи по исследованию источников W51 и W75N (как двух крайних случаев фарадеевского вращения) будут сданы в печать в первом квартале 2025 года.

III. Исследования внегалактических источников 3C 454.3, NGC 7469 и BL Lac (Л.С.Уголькова)

Проведены исследования трех внегалактических объектов: блазара 3C454, галактики NGC 7469 и лацертиды BL Lac.

Блазары демонстрируют значительную изменчивость во всех диапазонах электромагнитного спектра. Чтобы исследовать физическую природу изменчивости, проанализированы особенности корреляции оптического и гамма-излучения блазара 3C 454.3 для каждого года активности во время многоволновой вспышки с 2012 по 2017 год. Данные излучения блазара 3C454.3, полученные ранее в рамках проекта SMARTS, дополнены данными телескопов CrAO, Пулковской обсерватории и

приборов SAI (AZT-8, LX-200 и AZT-5), и сопоставлены с данными гамма-излучения, полученными с помощью прибора Fermi Gamma-ray.

Кривые блеска блазара 3C 454.3 имеют сложную структуру и каждый год демонстрируют вспышку со своими особенностями. Так в самом максимуме этой активности в 2014 году наблюдается активность в виде серии из 4-5 небольших уменьшающихся по величине вспышек с периодичностью примерно в 50 суток и коэффициентом корреляции почти 1 и отсутствием таковой через одну небольшую вспышку. Функции взаимной корреляции в другие годы показывают почти нулевое отставание между BVRI JK и гамма-излучением. Это позволяет предположить, что оптическое и гамма излучение исходят примерно из одной области (вероятно, из основания джета) и физически связаны. Предполагается, что присутствует как синхротронное излучение, так и обратное комптоновское рассеяние на релятивистских электронах и протонах, характерное для сильных вспышек.

Измерения оптической поляризации показали значительные изменения во время вспышки, с анти-корреляцией между оптическим потоком и степенью поляризации (которая меняется с $\sim 3\%$ до $\sim 20\%$) в других случаях наблюдается прямая корреляция. Вспышки сопровождались большими быстрыми колебаниями угла поляризации ~ 170 градусов. Эта комбинация поведения кажется уникальной. В тот же период у нас есть данные см-радиодиапазона, но они не показывают корреляции с вариациями на более высоких частотах. Такое специфическое поведение может быть объяснено с помощью струйных моделей, включающих полностью релятивистские эффекты с доминирующей областью источника, движущейся по спиральной траектории, или с помощью модели удара в струе, включающей трехмерный перенос излучения при наличии доминирующего спирального магнитного поля, что подтверждают многочисленные работы по данным РАДИОАСТРОНА наземных радиотелескопов.

Анализ долгопериодической переменности NGC 7469 для двух наблюдательных периодов 1990-2006 гг. и 2008-2015 гг. показал существование 3-х медленных компонент переменности 1994-2000 г., 2004-2007 г. и 2008-2014 г и быстрые F компоненты с временными масштабами от нескольких минут до двух месяцев. Показано, что одной из причин появления быстрой переменности является наложение на излучение ядра СГ излучения сверхновых 2000 и 2008 годов, вспыхнувших в минимумах активности NGC 7469 вблизи ядра. На кривых блеска галактики в 2000 г. и 2008 г., видны серии вспышек быстрой переменности NGC 7469 продолжительностью от нескольких дней до нескольких десятков дней. Обе серии вспышек (2000 г. и 2008 г.) совпадают по времени со вспышками Сверхновых (SN) с небольшим запаздыванием. SN 2000ft — это радио-сверхновая SN II, открытая 12 августа в радиодиапазоне и отраженная в работах Колины и др. (2001, 2007), Перез-Торес и др. (2009), Рекс и др. (2008). Возможно, что вспышка SN 2000ft спровоцировала появление сильных и продолжительных вспышек быстрой переменности (F-компоненты), особенно в 2002 и 2003 гг., которые наблюдаются на протяжении 3-х лет на кривой блеска NGC7469.

ПУБЛИКАЦИИ

По всем направлениям темы за 2024 год опубликовано 4 статьи в рецензируемых журналах и одна статья принята к печати. Сделано 6 докладов на различных научных конференциях.

Статьи

1. N. T. Ashimbaeva, E. E. Lekht, V. V. Krasnov, and V. R. Shoutenkov
Investigation of H₂O and OH Masers in the Region of Formation of a Young High-Mass Stellar Object (S255 NIRS 3)
ISSN 1063-7729, Astronomy Reports, 2024, Vol. 68, No. 5, pp. 453–471. © Pleiades Publishing, Ltd., 2024.

DOI: 10.1134/S106377292470043

2. E. E. Lekht, N. T. Ashimbaeva, V. V. Krasnov, and V. R. Shoutenkov

Study of Maser Emission in 18 cm Lines in the Star Formation Region G 109.871+2.114 (Cep A)
ISSN 1063-7729, Astronomy Reports, 2024, Vol. 68, No. 9, pp. 906–924. © Pleiades
Publishing, Ltd., 2024.

DOI: 10.1134/S106377292470080X

3. Bilenko I. A.,

“Meridional Circulations of the Solar Magnetic Fields of Different Strength”, Solar Phys., том 299,
с. 103-134, 2024 г.,

DOI: 10.1007/s11207-024-02332-9

4. Bilenko I. A.,

Cyclical Variations of Meridional Flows on the Sun, Geomagnetism and Aeronomy, том 64, No. 7,
с. 95-103, 2024 г.,

DOI: 10.1134/S0016793224700142

Принятые к печати:

1. E. E. Lekht, J. E. Mendoza-Torres, N. T. Ashimbaeva, V. V. Krasnov, and V. R. Shoutenkov

Long-term variability of water maser emission in S128.

Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica (2014)

Конференции:

1. Лехт Е.Е., Ашимбаева Н.Т.

“Мазерное излучение ОН в области звездообразования G109.871+2.114 (Cep A)”

Звездообразование и планетообразование – 2024, 11-1 ноября 2024,

АКЦ ФИАН, Москва (устный).

2. Лехт Е.Е., Ашимбаева Н.Т., Шутенков В.Р.

“Долговременная переменность мазерного излучения H₂O в источнике
звездообразования S128”

Звездообразование и планетообразование – 2024, 11-13 ноября 2024,

АКЦ ФИАН, Москва (устный).

3. Биленко И.А., “Характеристики меридиональной циркуляции солнечных магнитных полей”.
Девятнадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе», ИКИ РАН,
Москва, Россия, 5 – 9 февраля 2024 г. (Устный).

4. Биленко И. А., “Прогнозирование распространения и геоэффективности корональных выбросов
массы”. Симпозиум. Физические основы прогнозирования гелиогеофизических процессов и
событий (ПРОГНОЗ – 2024), г. Троицк. ИЗМИРАН, Россия, 27 – 31 мая 2024 г. (Устный).

5. Биленко И. А., “Закономерности и особенности смены знака полярных магнитных полей
Солнца в 21–25 циклах”. Всероссийская астрономическая конференция “Магнетизм и активность
Солнца – 2024”. Крымская астрофизическая обсерватория РАН (КрАО РАН), КРЫМ, ПГТ.
НАУЧНЫЙ, 1 – 5 июля 2024 г. (Устный).

6. Биленко И. А., “Особенности топологии солнечных магнитных полей в 21 – 25 циклах”, XXVIII
Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца “Солнечная и солнечно-земная физика – 2024”,
ГАО РАН, Санкт-Петербург, Россия, 7 – 11 октября 2024 г. (Устный).