

ИССЛЕДОВАНИЕ МАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОН 18 см И МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ОБЛАСТИ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ S128

© 2023 г. Н. Т. Ашимбаева¹, Е. Е. Лехт^{1,*}, В. В. Краснов², А. М. Толмачев³

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,

Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва, Россия

² Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

³ Пушчинская радиоастрономическая обсерватория,

Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Пушкино, Россия

*E-mail: lekht@sai.msu.ru

Поступила в редакцию 31.01.2023 г.

После доработки 02.05.2023 г.

Принята к публикации 18.05.2023 г.

Представлены результаты исследования переменности мазерного излучения в линиях ОН в диапазоне 18 см в области звездообразования S128 из данных мониторинга в 2007–2022 гг. на Большом радиотелескопе в Нансэ (Франция). В главной линии 1665 МГц наблюдалось мазерное излучение в течение всего мониторинга, а в спутных линиях 1612 и 1720 МГц наблюдалось только кратковременное излучение. Для четырех наиболее сильных деталей в линии 1665 МГц обнаружена переменность позиционного угла χ линейно поляризованного излучения. Зависимость χ от лучевой скорости в какой-то степени напоминает ограниченную синусоиду, что может быть связано с существованием организованной пространственной структуры мазерных пятен ОН и связанного с ней поперечного магнитного поля. Для двух зеемановских пар в линии 1612 МГц, имеющих близкие лучевые скорости (–75.236/–75.344 и –74.980/–74.903 км/с), обнаруженные расщепления имеют противоположные знаки и, следовательно, противоположные направления продольного магнитного поля. Для этих деталей также определены направления векторов поперечного магнитного поля. Видимо, магнитное поле является закрученным и связано с закрученным молекулярным потоком вещества.

Ключевые слова: звездообразование, мазеры ОН, молекулярные облака и биполярные потоки, магнитное поле, S128

DOI: 10.31857/S0004629923070022, **EDN:** NBTIDD

1. ВВЕДЕНИЕ

Область S128 является необычной среди всех областей активного звездообразования. Имеются два сталкивающихся молекулярных облака, разделенные между собой ионизационным фронтом, который простирается, в основном, с севера на юг (см. рис. 1, а также [1]). В восточном облаке СО(Е) вблизи ионизационного фронта имеется большой градиент лучевой скорости (см., напр., [1]). Западное облако СО(В) имеет малый градиент лучевой скорости. Считается, что восточное облако, взаимодействуя с западным, вытесняет его в направлении наблюдателя. Расстояние до S128 принимается кинематическое. Согласно Хоу и др. [2] оно составляет 7.5 кпк.

Вблизи ионизационного фронта находится сверхкомпактная область Н II (S128N) размером ~3'' [2]. Южнее от нее на 60'' расположена протяженная область Н II (S128) [2]. Вблизи каждой об-

ласти Н II находится ИК-источник: IRS1 вблизи протяженной области и IRS2 вблизи сверхкомпактной области Н II [3]. Считается, что звездообразование идет вдоль границы сталкивающихся облаков. Здесь могут быть специфические условия для стимулирования звездообразования. Например, рассматривается триггерный механизм, т.е. наблюдаемое звездообразование, вероятно, имеет общий пусковой механизм. В частности, в качестве возможных механизмов звездообразования было предложено одновременное звездообразование или возмущение, распространяющееся вдоль плоскости галактики [1].

Вдоль ионизационного фронта севернее и южнее сверхкомпактной области Н II S128N обнаружены два источника мазерного излучения H₂O А и В, расстояние между которыми составляет 13'' [4, 5]. Еще южнее на 30'' от Н II S128N обнаружен третий источник H₂O–С [6]. Однако в отличие от

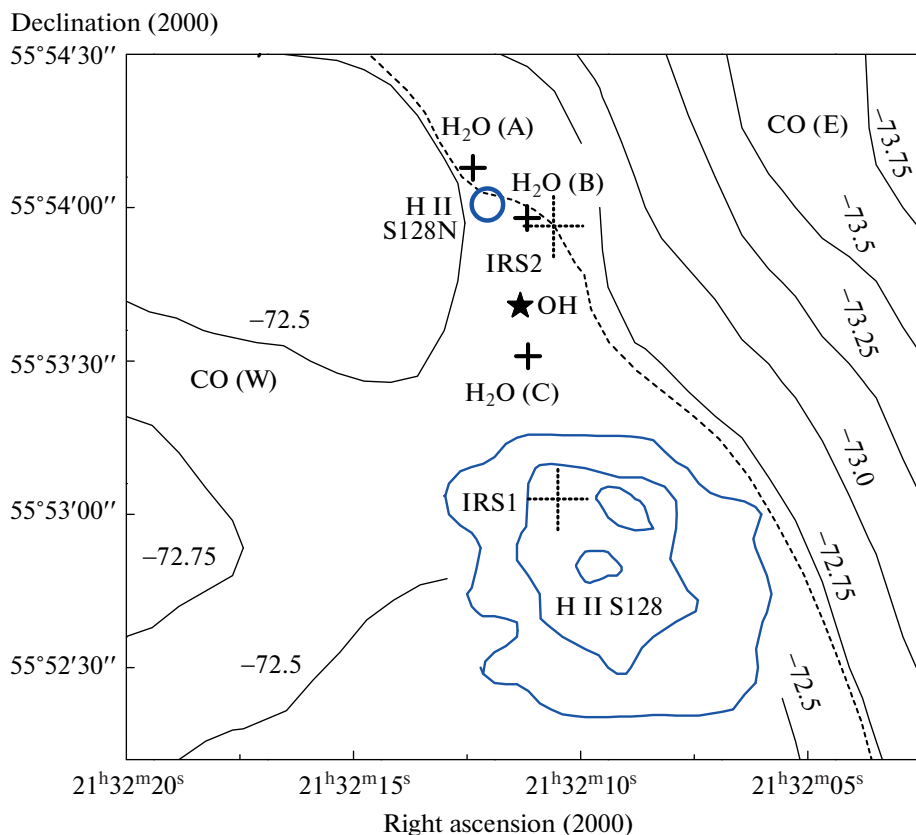


Рис. 1. Схематическое изображение центральной части области S128. Контуры линий равных скоростей облаков ^{12}CO , положения мазеров H_2O (A и B) и UCH II области взяты из работы Хашика и др. [1]. Указаны лучевые скорости в км/с для каждого контура. Компактная (H II S128N) и протяженная (H II S128) области H II нанесены кружком и изофотами соответственно. Положения ИК-источников показаны большими пунктирными крестиками, размеры которых соответствуют величинам ошибок. Жирными крестиками даны положения мазеров H_2O , а звездочкой — ОН. Пунктирной линией показана возможная граница раздела двух облаков CO, восточного и западного.

мазеров A и B он достаточно далеко отстоит от ионизационного фронта.

Мазер гидроксила в S128 был обнаружен в 1986 г. [7]. Он находится южнее сверхкомпактной области H II S128N. Мазерное излучение ОН достаточно слабое. Возможно по этой причине РСДБ-наблюдения не проводились. Исследование переменности излучения ОН с круговой поляризацией в линии 1665 МГц было изложено в работе Ашимбаевой и др. [8]. Было показано, что спектр содержит более 15 эмиссионных деталей с плотностью потока не более 2.5 Ян.

На рис. 1 видно, что мазер ОН значительно удален от ионизационного фронта (10^5 а.е.). По этой причине влияние процессов, происходящих при столкновении облаков CO, на изменение активности и параметров мазерного излучения ОН меньше, чем на мазеры H_2O A и B, расположенные вблизи фронта ударной волны. Именно этим проблемам, т.е. переменности поляризационных параметров мазерного излучения ОН

и магнитного поля в области S128 посвящена настоящая работа.

2. АППАРАТУРА И НАБЛЮДЕНИЯ

Мониторинг мазерного источника ОН в области звездообразования S128 проводится нами с 2007 г. на Большом радиотелескопе в Нансэ (Франция). В спутниковых линиях 1612 и 1720 МГц наблюдения были более эпизодическими, поскольку излучение в этих линиях наблюдалось редко. Описание аппаратуры и методики наблюдений неоднократно были изложены во всех наших предыдущих работах (см., напр., [9]).

Ширина диаграммы направленности телескопа на волне 18 см равна $3.5' \times 19'$ по прямому восхождению и склонению соответственно. Чувствительность телескопа составила 1.4 К/Ян для точечного источника неполяризованного излучения. С 2010 г. анализ сигнала осуществлялся автокорреляционным спектроанализатором с разрешением по лучевой скорости в линиях 1612, 1665

и 1720 МГц соответственно 0.0709, 0.0686 и 0.0665 км/с.

Излучение регистрировалось одновременно в обеих круговых поляризациях (RC и LC) и в двух направлениях линейной поляризации. Сначала направления плоскости поляризации антенны составляли 0° и 90° . После поворота облучателя на 45° осуществлялся прием излучения снова в обеих круговых и в двух других направлениях линейной поляризации 45° и 135° . Таким образом, осуществлялась регистрация шести мод поляризации. Отметим, что данные об излучении в круговых поляризациях являются избыточными. Однако в некоторых случаях мы это использовали для улучшения чувствительности в $\sqrt{2}$ раз при усреднении спектров в круговых поляризациях.

Наш мониторинг в линиях ОН показал, что стабильное мазерное излучение ОН в области S128 наблюдается только в главной линии 1665 МГц. Плотность потока в максимуме излучения (параметр Стокса I) никогда не превышала 2.7 Ян. В другой главной линии 1667 МГц излучение вообще не было зарегистрировано. Мазерное излучение в сателлитной линии 1612 МГц наблюдалось в 2018 г. В линии 1720 МГц излучение было более продолжительным.

На рис. 2 представлены спектры мазерного излучения в главной линии ОН 1665 МГц, полученные 8 апреля 2021 г. Вверху даны спектры в круговых поляризациях: жирной линией для правой (RC) и тонкой линией для левой (LC) круговых поляризаций соответственно. На панелях ниже даны спектры линейно поляризованного излучения для четырех направлений поляризации: $\chi = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ и 135° . Каждый спектр изучен детально. Результаты анализа представлены в следующем разделе.

Самое сильное излучение в линии 1612 МГц наблюдалось нами в 2018 г. На верхней панели рис. 3 показаны спектры в обеих круговых поляризациях. На панелях ниже представлены спектры в линейной поляризации для четырех значений позиционного угла антенны.

На рис. 4 даны спектры в линии 1720 МГц в обеих круговых поляризациях, полученные в 2012 г. Ниже представлен средний спектр, который фактически является параметром Стокса I , уменьшенным в 2 раза. Средний спектр позволяет уверенно выделить излучение на скорости -70.0 км/с. На панелях (в) и (г) показаны спектры эпохи 19 ноября 2014 г. для четырех позиционных углов линейной поляризации. В силу ряда обстоятельств именно в эту эпоху спектры были получены с лучшей чувствительностью и позволили уверенно определить значение позиционного угла χ . На нижней панели (д) дан средний спектр. На нем четко видны две детали. Никакие другие де-

тали с плотностью потока более 0.1 Ян не просматриваются.

Напомним, что из наблюдений мы получаем значения плотности потока $F(RC)$ и $F(LC)$ для круговой поляризации и $F(0^\circ)$, $F(45^\circ)$, $F(90^\circ)$ и $F(135^\circ)$ для линейной поляризации в четырех направлениях. Параметры Стокса вычислялись по формулам:

$$I = F(0^\circ) + F(90^\circ) = F(RC) + F(LC),$$

$$Q = F(0^\circ) - F(90^\circ),$$

$$U = F(45^\circ) - F(135^\circ),$$

$$V = F(RC) - F(LC).$$

Степень поляризации m_L и позиционный угол χ для линейной поляризации, степень круговой поляризации m_C были вычислены по формулам:

$$m_L = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I},$$

$$\chi = 0.5 \arctg(U/Q),$$

$$m_C = \frac{V}{I}.$$

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

3.1. Анализ спектров 1665 МГц

На рис. 5 нанесены степени и позиционные углы линейно поляризованного излучения для спектральных деталей в линии 1665 МГц. Наиболее интенсивные детали наблюдались в интервале лучевых скоростей от -74 до -69 км/с. Для них достаточно уверенно были вычислены параметры m_L и χ . Внизу на панели (б) показаны величины ошибок для параметра χ , которые учитывают погрешность измерения для каждой эпохи наблюдений и погрешность из-за разброса значений от эпохи к эпохе. Ввиду важности параметра χ ошибки вычислены для всех спектральных деталей. Отметим, что вне указанного выше диапазона лучевых скоростей детали слабее и величины ошибок для них больше. По этой причине для этих деталей мы исключили некоторые точки из графиков, которые сильно отклонялись от остальных. Для m_L ошибки вычислены только для нескольких деталей.

Средние значения m_L и χ для каждой детали (светлые кружки) соединены на графиках жирными линиями. Просматривается хорошо выраженная закономерность изменения перечисленных параметров вдоль спектра. В центральной части спектра степень линейной поляризации максимальная, а к периферии спектра она падает.

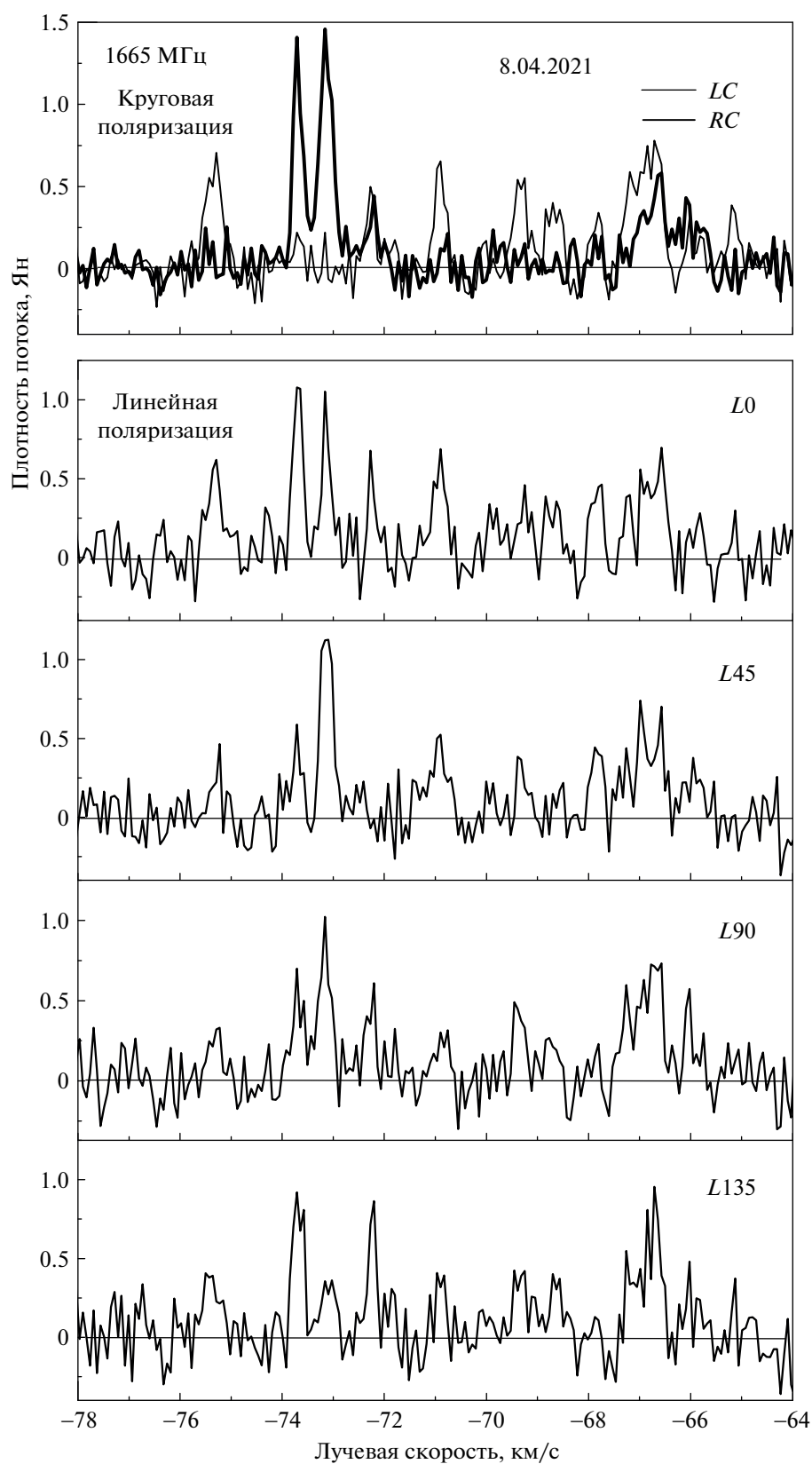


Рис. 2. Спектры в главной линии ОН 1665 МГц на эпоху 8 апреля 2021 г. На верхней панели спектры для круговых поляризаций: жирной линией для правой (*RC*) и тонкой линией для левой (*LC*) круговых поляризаций соответственно. Ниже даны спектры для четырех позиционных углов линейной поляризации.

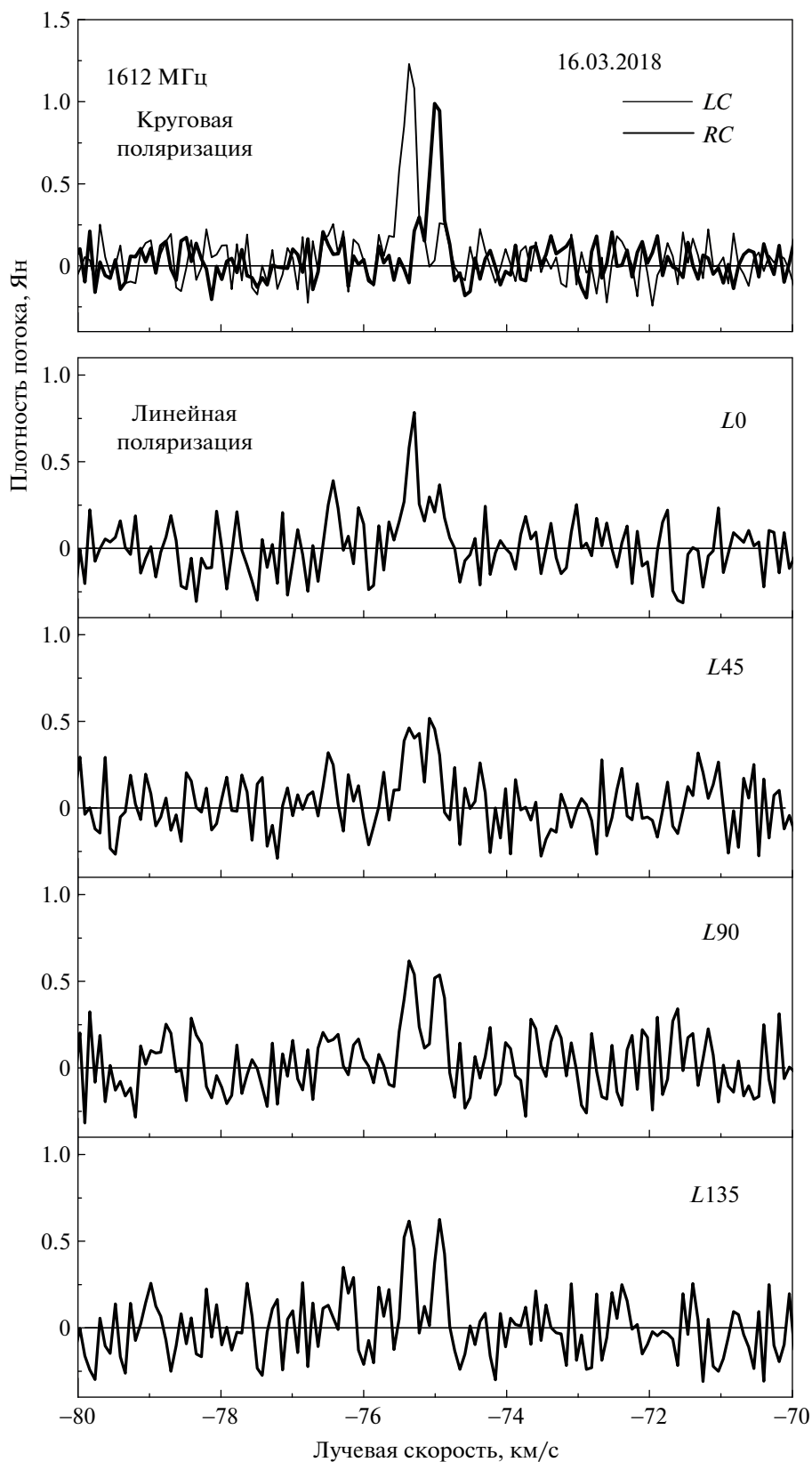


Рис. 3. Спектры в спутниковой линии 1612 МГц на эпоху 16 марта 2018 г. на верхней панели спектры для круговых поляризаций, а на нижних — спектры для четырех позиционных углов линейной поляризации.

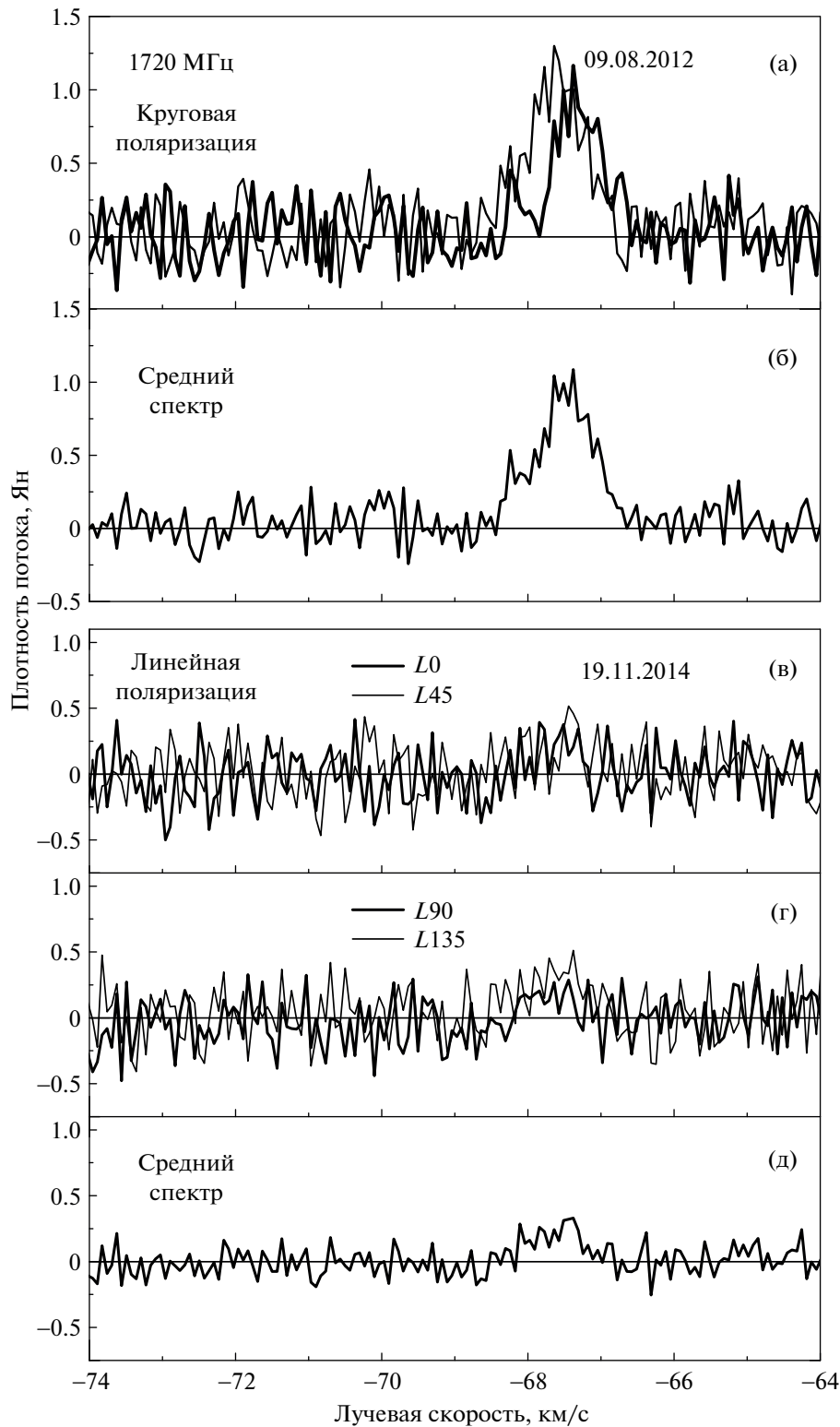


Рис. 4. Спектры в спутниковой линии 1720 МГц на эпоху 9 августа 2012 г. На панели (а) даны спектры для круговых поляризаций (жирной линией для правой (*RC*) и тонкой линией для левой (*LC*) круговых поляризаций соответственно), на панели (б) показан средний спектр. На панелях (в) и (г) представлены спектры эпохи 19 ноября 2014 г. для четырех позиционных углов линейной поляризации. На нижней панели (д) показан средний спектр.

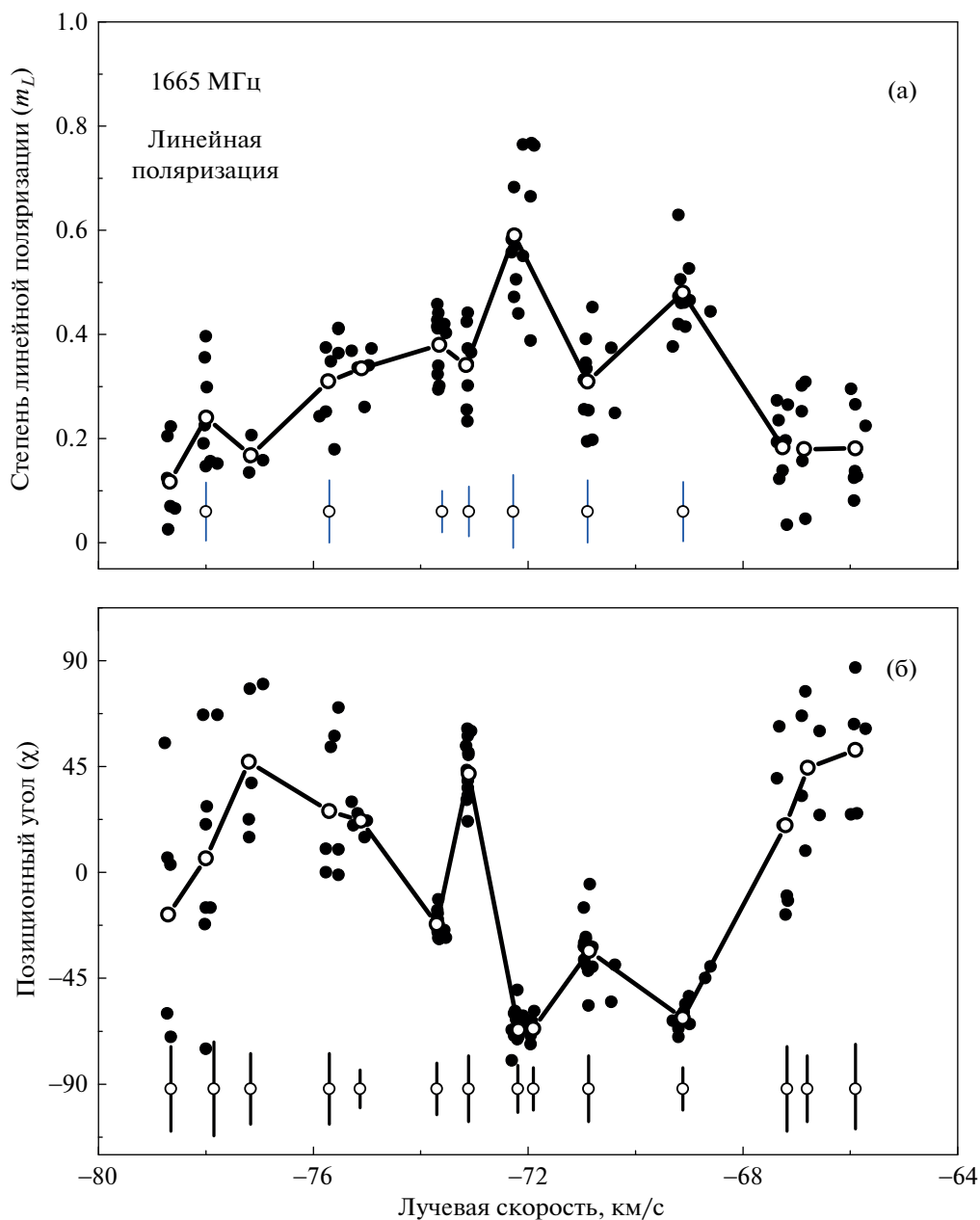


Рис. 5. Наложения графиков для степени (m_L) и позиционного угла (χ) линейной поляризации всех эпох наблюдений. Средние значения m_L и χ для каждой детали нанесены на графиках символами в виде светлых кружков, которые соединены жирными линиями. В нижней части панелей для m_L и χ показаны вычисленные ошибки средних значений (см. текст).

Зависимость χ от лучевой скорости в какой-то степени напоминает ограниченную синусоиду или меандр.

На рис. 6 мы также построили графики переменности χ и m_L для четырех и двух деталей соответственно. Очевидно, что временные изменения являются не случайными. Это также является аргументом в пользу существования упорядочен-

ной пространственной структуры мазерных конденсаций гидроксила.

Переменность плотности потока основных деталей в круговых поляризациях была изложена нами в работе [8]. Корреляция в характере переменности плотности потока наблюдается только для двух деталей: -72.15 и -70.94 км/с. Для этих же деталей имеется аналогичная корреляция переменности позиционного угла. Для одной из

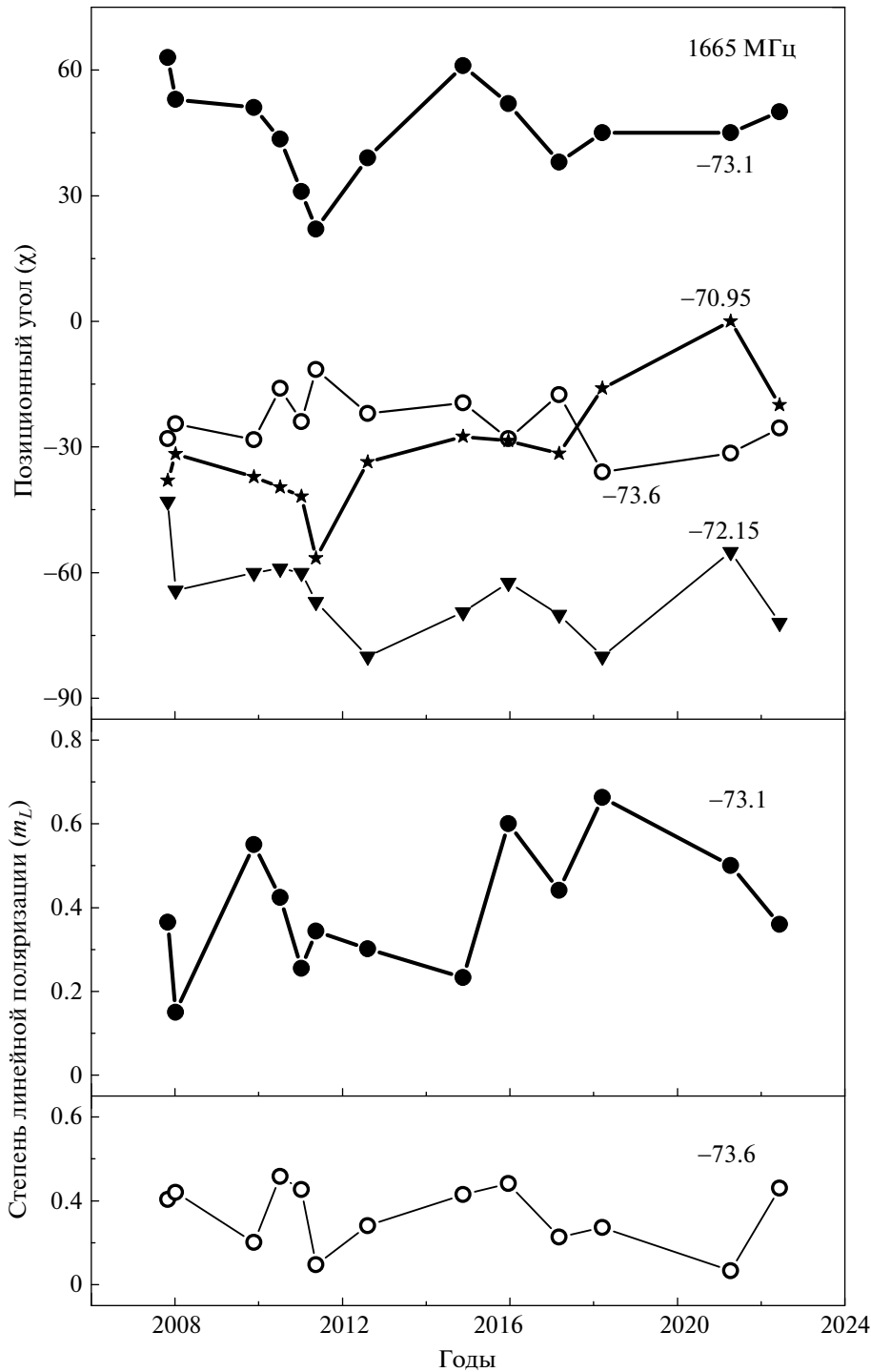


Рис. 6. Переменность позиционного угла χ и степени линейной поляризации m_L основных деталей спектра в линии 1665 МГц.

двух главных деталей на скорости -73.15 км/с позиционный угол незначительно уменьшался (исключая 2011–2012 гг.) (см. рис. 6), несмотря на значительный монотонный рост плотности потока (см. [8], рис. 8).

3.2. Анализ спектров 1612 и 1720 МГц

Несмотря на то что излучение в спутниковых линиях было кратковременным, получен ряд важных результатов. Общим свойством является

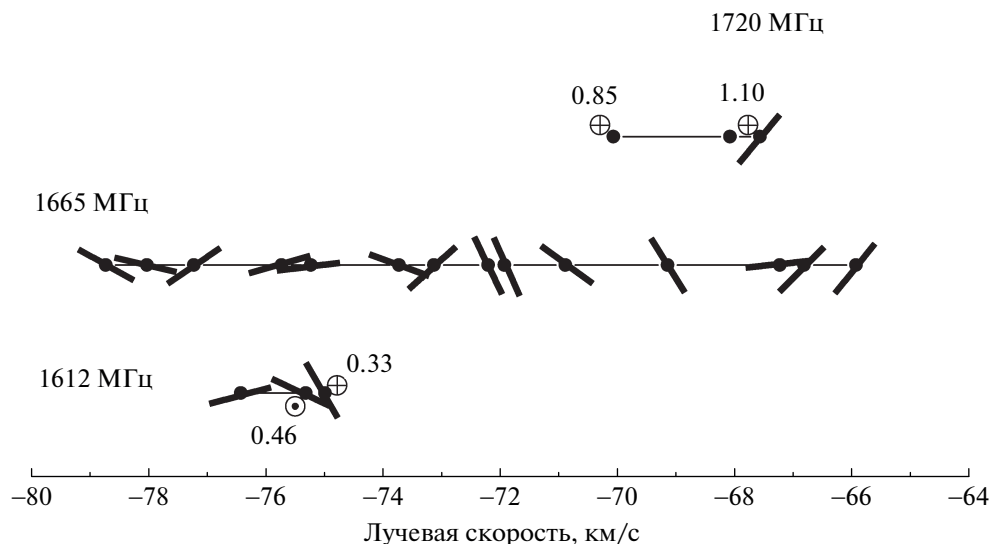


Рис. 7. Отрезками прямых линий нанесены векторы поперечного магнитного поля для каждой спектральной детали. Точка и крестики внутри кружков показывают направление продольного магнитного поля — к наблюдателю или от него соответственно. Рядом с ними указаны значения поля в мГс.

то, что спектры были достаточно простыми и излучение наблюдалось в узких интервалах лучевых скоростей. Различие состоит в том, что области излучения находятся в разных участках спектра. Кроме того, детали в спектрах 1612 МГц имеют ширину 0.2–0.3 км/с, а в спектрах 1720 МГц ширина деталей примерно в 2–3 раза больше.

В спектре 1612 МГц мы выделили две зеемановские пары (см. рис. 3). Они имеют достаточно близкие лучевые скорости и малое расщепление: $-75.236/-75.344$ и $-74.980/-74.903$ км/с. Обнаруженные расщепления имеют противоположные знаки: $+0.108$ и -0.077 км/с. Им соответствует продольное магнитное поле -0.46 и $+0.33$ мГс. Для этих деталей и для детали -76.40 км/с из наблюдений линейной поляризации мы также определили позиционные углы χ , равные -25° , -60° и 15° соответственно и, следовательно, направления векторов поперечного магнитного поля.

Также две зеемановские пары имеются в спектре 1720 МГц: $-70.16/-69.96$ и $-67.56/-67.30$. Зеемановское расщепление составило $+0.20$ и $+0.26$ км/с. Им соответствует продольное магнитное поле 0.85 и 1.10 мГс. Поле направлено от наблюдателя. Параметры линейной поляризации были вычислены только для более сильной детали, -67.56 км/с. В нашей предыдущей публикации [8] параметр Стокса V был вычислен путем вычитания спектра в левой круговой поляризации из спектра в правой поляризации без учета структуры линии. Наш анализ показал, что эта линия является двойной. Это хорошо проявляется в линейной поляризации. По этой причине

предпочтение следует отдать результату настоящей работы.

3.3. О структуре мазера ОН

На рис. 7 отрезками прямых линий нанесены средние значения векторов поперечного магнитного поля для всех спектральных деталей в линиях 1665 (взяты из рис. 5), 1612 и 1720 МГц, наблюдаемых нами в Нансэ. Точка и крестики внутри кружков показывают направление продольного магнитного поля — к наблюдателю или от него соответственно. Рядом с кружками указаны соответствующие им значения продольного магнитного поля в мГс. Полученная картина для линии 1612 МГц позволяет предположить, что магнитное поле является закрученным и, возможно, оно связано с закрученным молекулярным потоком вещества.

Напомним, что в S128 в спектрах 1612 и 1665 МГц ширина отдельных деталей составляет 0.2–0.3 км/с, в то время как температуре среды 60 К соответствует тепловая ширина линии более 1 км/с. В случае существования мелкомасштабных турбулентных движений ширина линии может быть еще больше. Таким образом, на 1612 и 1665 МГц имеет место сильный мазерный эффект. Детали в спектрах 1720 МГц имеют ширину 0.5–0.7 км/с. Возможно, что в областях формирования этого излучения более слабый мазерный эффект, или более существенными являются мелкомасштабные турбулентные движения.

Таким образом, можно предположить, что области мазерного излучения в спутниковых линиях пространственно не совпадают.

На рис. 7 видно, что в линии 1665 МГц для лучевых скоростей < -73.5 км/с преобладает горизонтальное поперечное магнитное поле, а для > -73.5 км/с вертикальное.

Так как в отдельных мазерных конденсациях меняется поперечное магнитное поле, то, согласно Фишу и др. [10] и Ашимбаевой и др. [11], магнитное поле может быть привязано к организованным структурам из мазерных конденсаций, а не только ко всей области Н II. Это хорошо проявляется при исследованиях других источников, например, в дугообразных структурах в W75N и в ряде других источников. Данное обстоятельство усиливает наше предположение о существовании организованной пространственной структуры мазерных конденсаций гидроксила в S128.

Существование организованной структуры мазера ОН подтверждается характером переменности параметров m_L и χ от лучевой скорости. Временные вариации этих параметров для некоторых деталей не являются случайными. Имеются также долговременные компоненты переменности. Все это, а также данные по магнитному полю показывают сложную структуру мазера гидроксила в S128. Конечно, для построения конкретной модели большой интерес представляют наблюдения области мазерного излучения ОН с высоким угловым разрешением и продолжение нашего мониторинга.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на то что в направлении источника S128, связанного с областью звездообразования, излучение ОН относительно слабое, благодаря высокой чувствительности радиотелескопа в Нансэ нам удалось измерить поляризационные характеристики мазерного излучения ОН в главной линии 1665 МГц и обеих спутниковых линиях 1612 и 1720 МГц. В другой главной линии 1667 МГц излучение не было обнаружено. Перечислим основные результаты, полученные в настоящей работе.

— Стабильно мазерное излучение наблюдалось только в линии 1665 МГц, а кратковременное в спутниковых линиях 1612 и 1720 МГц. В линии 1667 МГц излучение нами не наблюдалось.

— В линии 1665 МГц мы выделили в спектре 12 эмиссионных деталей с плотностью потока более 0.25 Ян. Детали достаточно равномерно расположены в спектре в диапазоне лучевых скоростей от -76 до -66 км/с.

— Для четырех наиболее сильных деталей переменность позиционного угла χ наблюдалась в

небольших интервалах значений. Зависимость χ от лучевой скорости в какой-то степени напоминает ограниченную синусоиду или меандр, что может быть связано с существованием организованной пространственной структурой мазерных пятен и связанного с ней поперечного магнитного поля.

— Для двух зеемановских пар в линии 1612 МГц, которые имеют близкие лучевые скорости ($-75.236/-75.344$ и $-74.980/-74.903$ км/с), обнаруженные расщепления имеют противоположные знаки. Для этих деталей также определены направления векторов поперечного магнитного поля. Видимо, магнитное поле является закрученным и связано с закрученным молекулярным потоком вещества.

Большой научный интерес представляют РСДБ исследования с высоким разрешением, которые позволят уточнить модель мазерного источника ОН в S128, в которой наблюдается корреляция упорядоченных значений лучевой скорости мазерных конденсаций и векторов поперечного магнитного поля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. D. Haschick and P. T. P. Ho, *Astrophys. J.* **292**, 200 (1985).
2. P. T. P. Ho, A. D. Haschick, and F. P. Israel, *Astrophys. J.* **362**, 147 (1981).
3. A. Mampaso, P. Gómez, C. Sanchez-Magro, and M. J. Selby, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **207**, 465 (1984).
4. A. D. Haschick and P. T. P. Ho, *Astrophys. J.* **292**, 200 (1985).
5. V. Migenes, S. Horiuchi, V. I. Slysh, I. E. Val'ts, et al., *Astrophys. J.* **123**, 487 (1999).
6. A. M. S. Richards, R. J. Cohen, M. Crocker, E. E. Lekht, E. Mendoza-Torres, and V. A. Samodourov, *Astrophys. Space Sci.* **295**, 19 (2004).
7. J. G. A. Wouterloot, J. Brand, and C. Henkel, *Astron. and Astrophys.* **191**, 323 (1988).
8. Н. Т. Ашимбаева, П. Колом, Е. Е. Лехт, М. И. Пащенко, Г. М. Рудницкий, А. М. Толмачев, *Астрон. журн.* **95**(9), 645 (2018).
9. В. И. Слыш, М. И. Пащенко, Г. М. Рудницкий, В. М. Витрищак, П. Колом, *Астрон. журн.* **87**(7), 655 (2010).
10. V. L. Fish and M. J. Reid, *Astrophys. J. Suppl.* **164**, 99 (2006).
11. П. Колом, Н. Т. Ашимбаева, Е. Е. Лехт, М. И. Пащенко, Г. М. Рудницкий, А. М. Толмачев, *Астрон. журн.* **98**(1), 50 (2021).

INVESTIGATION OF OH 18 CM MASER EMISSION AND MAGNETIC FIELD IN THE S128 STAR FORMATION REGION

N. T. Ashimbaeva^a, E. E. Lekht^a, V. V. Krasnov^b, and A. M. Tolmachev^c

^a *Lomonosov Moscow State University, P.K. Sternberg State Astronomical Institute, Moscow, Russia*

^b *Astrospace Center of the P.N. Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^c *Pushchino Radio Astronomy Observatory, Astrospace Center of the P.N. Lebedev Physical Institute,
Russian Academy
of Sciences, Pushchino, Russia*

The results of a study of the variability of OH maser emission in the lines of 18 cm in the S128 star formation region from monitoring data in 2007–2022 at the Large Radio Telescope in Nançay (France) are presented. Maser emission was observed in the main line of 1665 MHz during the entire monitoring, and only short-term emission was observed in the satellite lines of 1612 and 1720 MHz. For the four strongest features in the 1665 MHz line, the variability of the positional angle of linearly polarized emission was found. The dependence of the angle on the radial velocity to some extent resembles a limited sinusoid, which may be due to the existence of an organized spatial structure of maser spots and the associated transverse magnetic field. For two Zeeman pairs in the 1612 MHz line having similar radial velocities ($-75.344/-75.236$ and $-74.980/-74.903$ km/s), the detected splits have opposite signs and, therefore, opposite directions of the longitudinal magnetic field. The directions of the transverse magnetic field vectors are also determined for these features. Apparently, the magnetic field is swirling and is associated with a swirling molecular outflows of matter.

Keywords: star formation, OH masers, molecular clouds and bipolar outflows, magnetic field, individual objects (S128)