

**НАБЛЮДЕНИЕ В РАДИОДИАПАЗОНЕ ЛИНИИ ПОГЛОЩЕНИЯ
ГИДРОКСИЛА (ОН) В ВОЛОКНАХ И ПРОТУБЕРАНЦАХ
НАД АКТИВНЫМИ ОБЛАСТЯМИ СОЛНЦА**

**OBSERVATION AT RADIO FREQUENCIES OF THE HYDROXYL (OH)
ABSORPTION LINE IN FILAMENTS AND PROMINENCES
ABOVE ACTIVE REGIONS OF THE SUN**

Н.Е. Овчинникова 

Санкт-Петербургский филиал Специальной астрофизической обсерватории РАН,
Санкт-Петербург, Россия, n.e.ovchinnikova@gmail.com

N.E. Ovchinnikova

Special Astrophysical Observatory,
St. Petersburg, Russia, n.e.ovchinnikova@gmail.com

В.М. Богод 

Санкт-Петербургский филиал Специальной астрофизической обсерватории РАН,
Санкт-Петербург, Россия, vbog_spb@mail.ru

V.M. Bogod

Special Astrophysical Observatory,
St. Petersburg, Russia, vbog_spb@mail.ru

М.К. Лебедев 

Санкт-Петербургский филиал Специальной астрофизической обсерватории РАН,
Санкт-Петербург, Россия, m.k.lebedev@gmail.com

M.K. Lebedev

Special Astrophysical Observatory,
St. Petersburg, Russia, m.k.lebedev@gmail.com

Аннотация. При наблюдениях Солнца на радиотелескопе РАТАН-600 с использованием спектрополяризметрического комплекса диапазона 1–3 ГГц в радиоизлучении отдельных активных областей Солнца, находящихся под холодным волокном или на лимбе под протуберанцем, а также при наблюдении коронального дождя было обнаружено поглощение в области спектра 1.5–1.65 ГГц. Наблюдаемая структура линий соответствует частотам сверхтонкого расщепления в основном состоянии $X^2\Pi_{3/2}$ гидроксила (ОН) 1612–1720 МГц. При прохождении наблюдаемой области через ножевую диаграмму направленности антенны телескопа полоса поглощения смещается по частоте в результате сдвига энергетических уровней молекулы ОН в магнитном поле, которое меняется вдоль волокна.

Ключевые слова: Солнце, корональные структуры, линии поглощения, гидроксил.

Abstract. When observing the Sun with RATAN-600 radio telescope using a spectropolarimetric complex in the range 1–3 GHz, as well as when observing coronal rain, absorption in the radio emission was discovered in the spectral region 1.5–1.65 GHz in active solar regions located under a cold filament or on the limb under a prominence. The observed line structure corresponds to the hyperfine splitting frequencies in the ground state of $X^2\Pi_{3/2}$ hydroxyl (OH) 1612–1720 MHz. When the observed active region passes through the knife-shaped beam pattern of the telescope antenna, the absorption band shifts in frequency due to a shift in the energy levels of the OH molecule in a magnetic field, which changes along the filament.

Keywords: Sun, coronal structures, absorption lines, hydroxyl.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование спектрального состава излучения физических объектов позволяет понять их внутреннюю природу. Спектроскопические наблюдения Солнца ведутся на уровнях фотосферы и хромосферы, поскольку наблюдения короны в оптических диапазонах ограничены низкой плотностью плазмы, высокой температурой ($\sim 10^6$ К) и недостаточной чувствительностью существующих инструментов.

Поиск линий излучения атомарного водорода ведется уже давно [Wild, 1952; Херсонский, Варшалович, 1980; Дравских, Дравских, 2022]. Линии поглощения гидроксила (ОН) на Солнце наблюдаются на фотосфере в ИК-диапазоне; обнаружение гидроксила считается маркером присутствия молекулярного

водорода [Jaeggli et al., 2012]. Это позволяет предполагать наличие гидроксила в холодных образованиях в короне (волокна, протуберанцы и корональный дождь) и ожидать возможности обнаружения его линий в радиодиапазоне. Радиоизлучение активных областей (АО) на Солнце определяется структурой сильных магнитных полей солнечной короны, в которых эффект Зеемана приводит к измеримому расщеплению атомных уровней и поляризации излучаемого света [Derouich, 2017]. Однако современные инструменты, работающие в радиодиапазоне, не имеют либо достаточного частотного разрешения, либо достаточной чувствительности для наблюдения тонкой структуры излучения отдельных корональных образований.

1. СПЕКТРАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ НА РАТАН-600 В ДИАПАЗОНЕ 1–3 ГГц

Данные, получаемые на спектрополяриметрических солнечных комплексах телескопа РАТАН-600, представляют собой временные серии спектрограмм радиоизлучения Солнца в диапазоне 1–18 ГГц. Параметры комплекса 1–3 ГГц [Рипак и др., 2023]:

- полное разрешение по частоте — 122 кГц;
- полное число частотных каналов — 2×8192 ;
- измеряемые поляризации — круговые правая и левая;
- временное разрешение — 8 мс/спектр;
- температура входных шумов аппаратуры — 100–300 К;
- динамический диапазон — 30–60 дБ (30 дБ — система ЦОС, 60 дБ — управляемые аттенюаторы);
- усреднение по частоте — 8–64 раз (128–1024 канала/ГГц);
- выходное разрешение по частоте — 1–8 МГц;
- возможность изучения динамики процесса в режиме многократного 10-минутного сопровождения выбранного объекта на солнечном диске.

За счет большого динамического диапазона и высокого временного разрешения приемной системы комплекса (приблизительно 119 спектров в секунду во всем частотном диапазоне) при сканировании Солнца диаграммой направленности антенны вдоль суточной параллели происходит регистрация изменений спектральной плотности потока радиоизлучения на уровне 0.1 солнечной единицы потока (10^3 Ян) в пределах ширины диаграммы. Эти изменения обусловлены активными структурами короны внутри площади, захватываемой диаграммой на каждой частоте. В диапазоне частот 1–3 ГГц ширина диаграммы направленности (ДН) антенной системы (АС) РАТАН-600 «Юг+Плоский» сильно зависит от длины волны (от 84" до 252") и пространственное разрешение АС изменяется в три раза. Поэтому при работе в широкой полосе частот наблюдательные данные подвергаются операции обращения свертки с теоретической горизонтальной ДН, рассчитанной методом апертурного интегрирования. В результате радиоизображение источников, ширина которых составляет более четверти ширины диаграммы, приводится к своей истинной ширине на соответствующих длинах волн, что позволяет разрешить находящиеся в непосредственной близости от них точечные источники при условии, что отношение потока от точечного источника к фону превышает отношение мощности шума к мощности фонового сигнала (в наших измерениях оно составляет 10^{-3}). Размеры восстановленного радиоизображения точечного источника при этом не превышают четверти ширины диаграммы; интегральная плотность потока от источника при этом сохраняется.

При проведении наблюдений с высоким разрешением (1 МГц) и в режиме сопровождения выбранной АО рупор комплекса устанавливается точно в фокусе АС, в то время как при многоазимутальных наблюдениях в штатном режиме с разрешением 4 МГц рупор

вынесен из фокуса на 430 мм. Спектрограммы горизонтальной ДН АС РАТАН-600 «Юг+Плоский» для обоих положений рупора 1–3 ГГц показаны на рис. 1, а, б соответственно.

В режиме сопровождения регистрация осуществляется аналогично пассажному режиму в пределах ширины горизонтальной ДН антенны. Сопровождение используется для повышения чувствительности за счет временного накопления сигнала.

Для обработки многоволновых данных мы используем методы факторного анализа [Smilde et al., 2005], в частности, анализ главных компонент (PCA), использующий сингулярное разложение (SVD), который давно используется в спектроскопии (в том числе в астрофизике) [Heyer, Schloerb, 1997].

Применительно к данным радиоизлучения Солнца последовательно выделяются медленно меняющаяся компонента (излучение спокойного Солнца и тепловое излучение АО, проявляющееся на всех частотах); быстро меняющиеся во времени или локализованные по частоте спектральные компоненты, такие как всплески, линии излучения или поглощения; локальные помехи и сигналы спутников и, наконец, компоненты гауссовского шума.

Калибровка данных по спектральной плотности потока проводится по спектру потока спокойного Солнца, т. е. спектру потока радиоизлучения Солнца в период наименьшей активности (солнечного минимума). Для расчета доли спектральной плотности потока спокойного Солнца, принимаемой антенной системой «Юг+Плоский» РАТАН-600, мы используем данные радиополяриметра Нобеема (NoRP) и сети солнечных радиотелескопов (RSTN), а также данные микроволнового радиояркого температурного спектра спокойного Солнца [Zirin et al., 1991]. Данные наблюдений калибруются в предположении, что рассчитанные таким образом значения являются спектрами первой главной компоненты в разложении PCA.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Впервые спектральная компонента поглощения в радиодиапазоне была обнаружена в наших наблюдениях за декабрь 2021 г. при обработке тестовых измерений нового комплекса с разрешением 1 МГц.

Линия поглощения наблюдалась в марте и июне 2022 г. [Ovchinnikova et al., 2022], марте, мае и сентябре 2023 г., январе–марте 2024 г. Наблюдения проводились как в пассажном режиме, так и в режиме сопровождения с разрешением от 1 до 4 МГц.

Расщепление энергетических уровней в магнитном поле обусловлено снятием вырождения по квантовому числу магнитного момента. Взаимодействие магнитного момента с полем изменяет энергию уровня в зависимости от взаимной ориентации магнитного момента и поля. В молекуле ОН для каждого из уровней Λ -дублета сверхтонкой структуры основного состояния $X^2\Pi_{3/2}$ нижний подуровень расщепляется на три, верхний — на пять зеэмановских подуровней. Согласно правилам отбора, разрешенными являются переходы с изменением магнитного

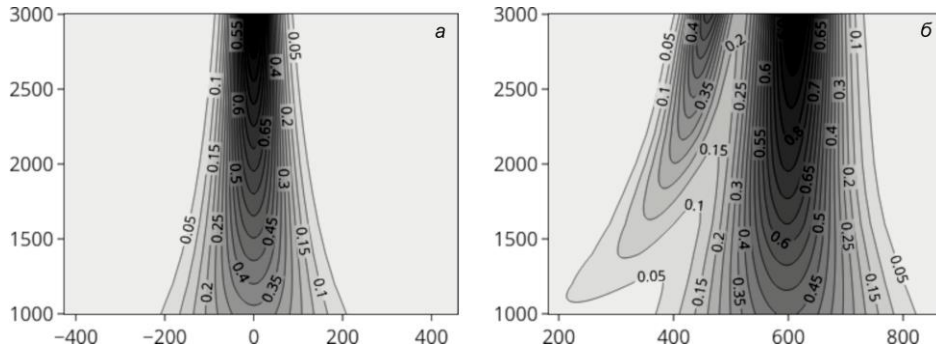


Рис. 1. Горизонтальная ДН АС РАТАН-600 «Юг+Плоский» в диапазоне 1–3 ГГц при нахождении приемника в фокусе (а) и при смещении из фокуса на 430 мм (б). Горизонтальная ось — угловые секунды, вертикальная — частота в МГц

квантового числа $\Delta M_J = 0, \pm 1$. Структура энергетических уровней молекулы ОН такова, что при наложении внешнего магнитного поля для переходов с $\Delta M_J = +1$ возникает компонента σ^- с частотой, меньше исходной частоты перехода. По схеме энергетических уровней [Maeda et al., 2015] для значений B в пределах нескольких десятков гаусс можно оценить это изменение как 1.4–1.5 МГц/Гс. Переходам с $\Delta M_J = -1$ соответствует σ^+ -компонента, смещенная в сторону большей частоты. Если поле превышает 20–25 Гс, сдвиг частоты составляет 35–40 МГц и ее излучение попадает в полосу заградительного фильтра приемника.

Если направление магнитного поля параллельно лучу зрения, в поглощении в одной из круговых поляризаций будет наблюдаться σ^- -компонента. В случае, если магнитное поле не превышает 20 Гс, во второй круговой поляризации будет наблюдаться сигнал σ^+ -компоненты. Кроме того, в обеих круговых поляризациях будут наблюдаться равные по амплитуде сигналы не смещенной по частоте π -компоненты.

Если направление магнитного поля перпендикулярно лучу зрения, в обеих круговых поляризациях будут наблюдаться равные по амплитуде сигналы σ^- -компоненты, а если магнитное поле не превышает 20 Гс, то и равные по амплитуде сигналы σ^+ -компоненты.

В промежуточных случаях сигналы с частотами $f_0, f_0 \pm \Delta f$ будут наблюдаться в обеих поляризациях, а их амплитуды будут зависеть от угла между направлением магнитного поля и лучом зрения.

Для приведенных наблюдений смещение линий 1.65–1.67 ГГц составляло 70–100 МГц, что соответствует полю ~50–70 Гс, 80 МГц (~60 Гс), и 30 МГц (~20 Гс).

29 января 2024 г. на западном лимбе Солнца над областью NOAA 13559 наблюдался корональный дождь. На рис. 2, б показаны спектрограммы радиоизлучения всего диска Солнца в диапазоне 1.0–1.7 ГГц в двух поляризациях, сопоставленные со снимком SDO/AIA 304 Å (рис. 2, а), повернутым в соответствии с позиционным углом ДН антенны РАТАН-600; на частоте 1600 МГц горизонтальная ДН составляет 157". На рис. 2, в показаны спектры выделенной области коронального дождя (от +940" до +1100" от центра солнечного диска в направлении, перпенди-

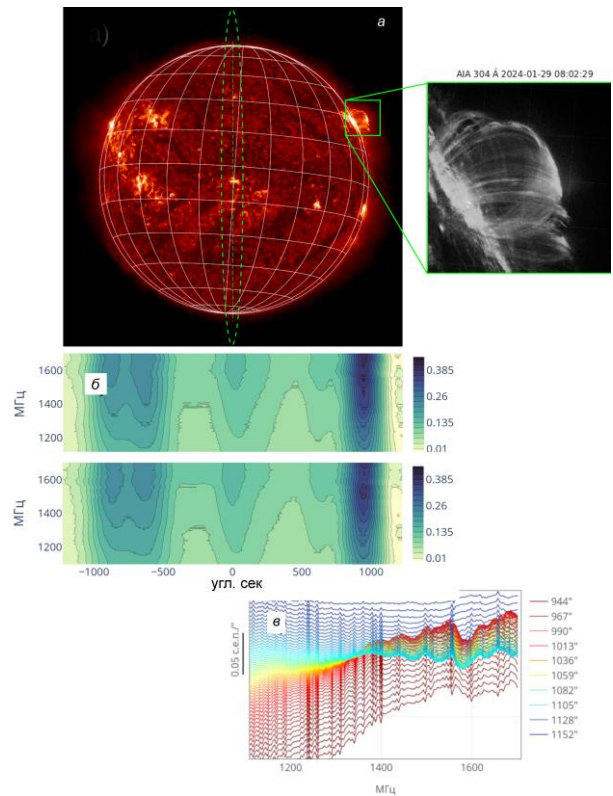


Рис. 2. Наблюдения 29 января 2024 г.: а — снимок SDO/AIA 304 Å, штриховая линия — положение ДН на частоте 1600 МГц в момент прохождения оси азимута в транзитном режиме; б — спектрограмма Солнца в транзите в двух поляризациях после обращения свертки с ДН; в — спектры радиоизлучения после обращения свертки с ДН области от +940" до +1100" от центра солнечного диска, соответствующей корональному дождю (на врезке)

кулярном вертикальной оси ДН). В области 1.567–1.598 ГГц наблюдается смещающаяся линия поглощения, минимум которой, предположительно, соответствует центральной линии гидроксила (1.665–1.667 ГГц). Сдвиг положения линии на 60–100 МГц вызван сильным магнитным полем, обуславливающим образование коронального дождя.

Линии поглощения в области 1.59–1.61 ГГц и 1.65–1.68 ГГц наблюдались в излучении АО NOAA 13030 с волокном 18 июня 2022 г. на диске Солнца и 24 июня 2022 г. при выходе той же АО на западный лимб с образованием протуберанца. Результаты наблюдений показаны на рис. 3, 4 соответственно.

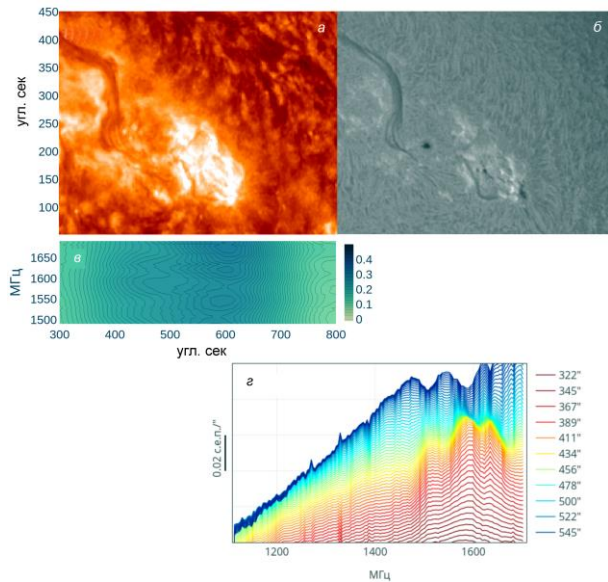


Рис. 3. Наблюдения АО NOAA 13030 с волоком на диске Солнца 18 июня 2022 г.: *a*, *б* — снимки АО SDO/AIA 304 Å и GONG H α /6562.8 Å соответственно; *в* — спектрограмма радиоизлучения АО в транзите в левой поляризации после обращения свертки с ДН; *г* — спектры радиоизлучения АО после обращения свертки с ДН (от +322" до +545" от центра солнечного диска)

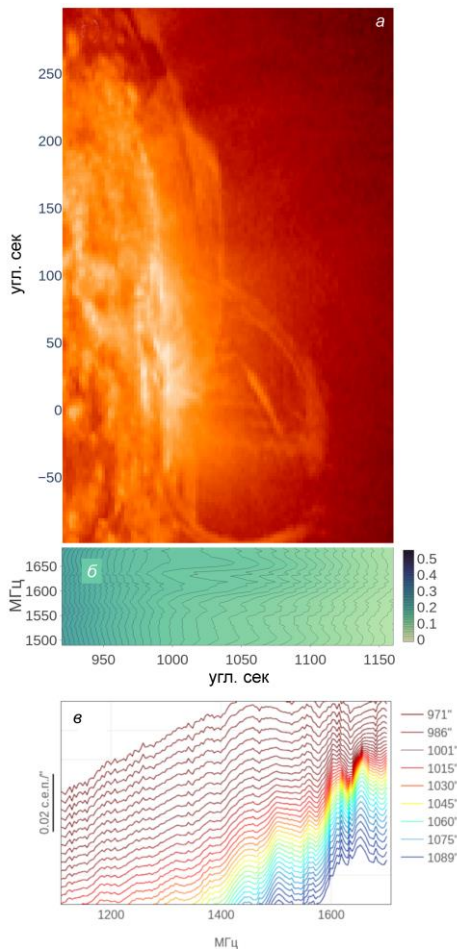


Рис. 4. Наблюдения АО NOAA 13030 на лимбе с протуберанцем 24 июня 2022 г.: *a* — снимок АО SDO AIA 304 Å; *б* — спектрограмма радиоизлучения АО в транзите в правой поляризации после обращения свертки с ДН; *в* — спектры радиоизлучения АО после обращения свертки с ДН (от +970" до +1090" от центра солнечного диска)

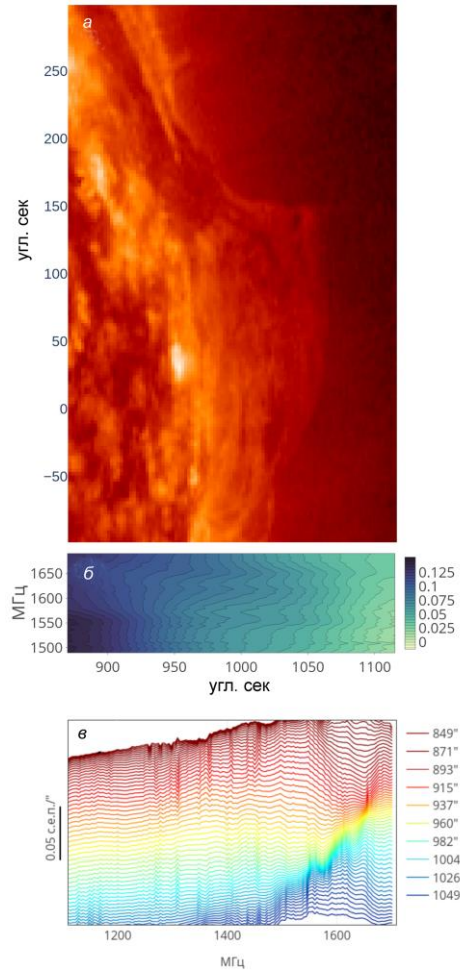


Рис. 5. Наблюдения NOAA 13586 на лимбе с волоком, переходящим в протуберанец, 25 февраля 2024 г.: *a* — снимок АО SDO/AIA 304 Å; *б* — спектрограмма радиоизлучения АО после обращения свертки с ДН; *в* — спектры радиоизлучения АО после обращения свертки с ДН (от +849" до +1049" от центра солнечного диска)

В феврале 2024 г. в излучении АО NOAA 13586 на лимбе с волоком, переходящим в протуберанец, наблюдалась линия поглощения в области 1.59–1.645 ГГц (рис. 5).

21 марта 2024 г. линия поглощения в радиоизлучении АО NOAA 13614 с волоком наблюдалась как в транзитном режиме, так и в режиме сопровождения с разрешением по частоте 4 МГц. Результаты наблюдений показаны на рис. 6. На рис. 6, *г* приведен спектр радиоизлучения АО NOAA 13614 при сопровождении в течение 7 мин (09:01:34–09:08:34 UTC) без излучения спокойного Солнца и теплового излучения АО. Магнитное поле в наблюдаемой области, согласно [Maeda et al., 2015], можно оценить как ~50–60 Гс.

Для оценки поглощения воспользуемся данными спектроскопической базы HITRAN [Gordon et al., 2022], которая содержит значения интенсивности спектральных линий $S_{ij}(T_{\text{ref}})$ для температуры $T_{\text{ref}} = 296$ К и таблицы статистических сумм.

Табличные значения статистических сумм $Q(296 \text{ К}) = 80.34827$, $Q(5000 \text{ К}) = 2524.97805$.

Для температуры T значение $S_{ij}(T)$ может быть получено по формуле

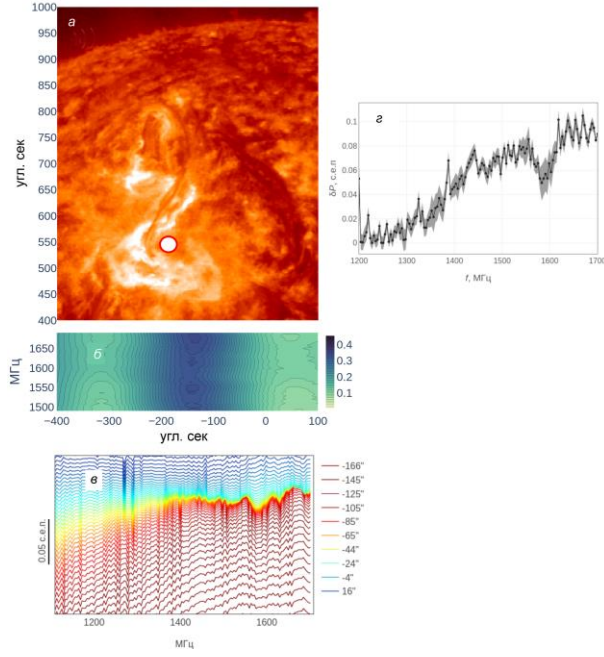


Рис. 6. Наблюдения АО NOAA 13614 21 марта 2024 г.: *а* — снимок SDO/AIA 304 Å (кружком обозначено положение центра ДН антенны RATAN-600 при сопровождении); *б* — спектрограмма радиоизлучения АО в транзитном режиме; *в* — спектры радиоизлучения АО (от $-166''$ до $+16''$ от центра солнечного диска); *г* — усредненный спектр волокна в АО NOAA 13614 с разрешением 4 МГц, полученный в процессе сопровождения в интервале 09:01:34–09:08:34 UTC; достигнутую чувствительность можно оценить как 0.01 с.е.п.

$$S_{ij}(T) = S_{ij}(T_{\text{ref}}) \frac{Q(T_{\text{ref}})}{Q(T)} \frac{e^{-c_2 E_i / T}}{e^{-c_2 E_i / T_{\text{ref}}}} \frac{1 - e^{-c_2 \nu_{ij} / T}}{1 - e^{-c_2 \nu_{ij} / T_{\text{ref}}}},$$

где $Q(T)$ — значение статистической суммы для данного вещества при температуре T ; ν_{ij} — волновое число для рассматриваемой линии; $c_2 = hc/k$; h — постоянная Планка; c — скорость света; k — постоянная Больцмана.

Коэффициент поглощения на волне ν

$$\alpha(\nu, T) = S_{ij}(T) f(\nu, T),$$

где $f(\nu, T)$ — форма профиля спектральной линии

$$f(\nu, T) = \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi w^2(T)}} e^{-\frac{(\nu - \nu_{ij})^2 \ln 2}{w^2(T)}},$$

$w(T)$ — половина ширины линии на половине ее высоты

$$w(T) = \frac{\nu_{ij}}{c} \sqrt{\frac{2kT \ln 2 N_A}{M}},$$

N_A — число Авогадро; M — молярная масса вещества.

Поглощение в среде определяется законом Ламберта—Бера:

$$\frac{I}{I_0} e^{-\alpha(\nu, T)u},$$

где I — интенсивность излучения, прошедшего через слой вещества; I_0 — интенсивность излучения

на входе в слой вещества; u — столбцовая плотность вещества:

$$u = \int_0^l n(l) dl,$$

где $n(l)$ — объемная концентрация вещества. В частности, если $n(l) = \text{const}$, то $u = nL$, где L — толщина слоя.

Содержание кислорода в фотосфере $\log \epsilon(\text{O})$ составляет ~ 8.8 dex [Bergemann et al., 2021]. Высоту волокна (при выходе его на лимб) мы оценили как ~ 15000 км. Принимая, что весь кислород в толще волокна связан с водородом, для температуры ~ 5000 К [Park et al., 2013; Sanetaka Okada et al., 2020] получаем верхнюю оценку поглощения $\sim 0.15\%$ при ширине линии ~ 20 МГц.

Это соответствует по порядку величины значениям, полученным по результатам наблюдений 21 марта 2024 г. в режиме сопровождения: спектральная плотность потока в АО 13614 составила 15.4–17.4 с.е.п., тогда как поглощение можно оценить как ~ 0.25 с.е.п. (см. рис. 6, г) при ширине линии ~ 40 МГц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повышение чувствительности приема путем применения аппаратуры нового поколения с высоким частотным разрешением и режима наблюдений с накоплением сигнала за счет длительного сопровождения источника в сочетании с методами статистического анализа данных открывает возможность исследования малых изменений сигнала на фоне мощного радиоизлучения Солнца. Впервые в мировой практике нам удалось зарегистрировать отдельные спектральные линии в радиодиапазоне на уровне солнечной короны. Новые наблюдательные данные, полученные в январе–марте 2024 г. подтверждают наши предыдущие результаты [Овчинникова и др., 2023]. Приведенные оценки поглощения и ширины линии позволяют предполагать, что наблюдаемое нами поглощение в области 1.5–1.7 ГГц может быть объяснено присутствием гидроксила в плотных холодных образованиях в короне.

Наблюдения на телескопах САО РАН проводятся при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Обновление приборной базы осуществляется в рамках национального проекта «Наука и университеты».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Дравских А.Ф., Дравских Ю.А. Рекомбинационные радиолнии на Солнце. *Астрон. журн.* 2022. Т. 99, № 6. С. 496–505. DOI: 10.31857/S0004629922060032.

Овчинникова Н.Е., Богод В.М., Лебедев М.К. Обнаружение линии поглощения гидроксила (ОН) в радиоизлучении короны солнца. *Труды XXVII Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика – 2023»*, Санкт-Петербург, 2023. С. 245.

Рипак А.М., Богод В.М., Гренков С.А., Лебедев М.К. Помехоустойчивый радиометр дециметрового диапазона для радиотелескопа RATAN-600. *Астрофизический бюллетень.* 2023. Т. 78, № 4. С. 657–669. DOI: 10.1134/S1990341323600291.

Херсонский В.К., Варшалович Д.А. Возможность наблюдения рекомбинационных линий в солнечном излучении. *Астрон. журн.* 1980. Т. 57. С. 621–623.

Bergemann M., Hoppe R., Semanova E., et al. Solar oxygen abundance. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2021. Vol. 508, iss. 2. P. 2236–2253. DOI: [10.1093/mnras/stab2160](https://doi.org/10.1093/mnras/stab2160).

Derouich M. Inversion of Zeeman polarization for solar magnetic field diagnostics. *New Astronomy*. 2017. Vol. 53. P. 26–34. DOI: [10.1016/j.newast.2016.11.007](https://doi.org/10.1016/j.newast.2016.11.007).

Gordon L.S., Rothman L.S., Hargreaves R.J., et al. The HITRAN2020 molecular spectroscopic database. *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2022. Vol. 277. P. 31–42. DOI: [10.1016/j.jqsrt.2021.107949](https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2021.107949).

Heyer M.H., Schloerb F.P. Application of principal component analysis to large-scale spectral line imaging studies of the interstellar medium. *Astrophys. J.* 1997. Vol. 475, no. 1. P. 173–187. DOI: [10.1086/303514](https://doi.org/10.1086/303514).

Jaeggli S.A., Lin H., Uitenbroek H. On molecular hydrogen formation and the magnetohydrostatic equilibrium of sunspots. *Astrophys. J.* 2012. Vol. 745, no. 2. Article id. 133. 16 p. DOI: [10.1088/0004-637X/745/2/133](https://doi.org/10.1088/0004-637X/745/2/133).

Maeda K., Wall M.L., Carr L.D. Hyperfine structure of the hydroxyl free radical (OH) in electric and magnetic fields. *New J. Phys.* 2015. Vol. 17. 045014 DOI: [10.1088/1367-2630/17/4/045014](https://doi.org/10.1088/1367-2630/17/4/045014).

Ovchinnikova N.E., Lebedev M.K., Bogod V.M., et al. Results of a new approach to the analysis of multi-wavelength observations data obtained with RATAN-600. *Proc. The Multifaceted Universe: Theory and Observations. PoS(MUTO2022)*. 2022. P. 425.

Park H., Chae J., Song D., et al. Temperature of solar prominences obtained with the fast imaging solar spectrograph on the 1.6 m New Solar Telescope at the Big Bear Solar Observatory. *Initial Results from the Fast Imaging Solar Spectrograph (FISS)*. Cham. 2013. P. 105–116. DOI: [10.1007/978-3-319-12123-9_7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-12123-9_7).

Sanetaka Okada, Kiyoshi Ichimoto, Aki Machida, Satomi Tokuda, Yuwei Huang, Satoru Ueno. Temperature analysis of solar prominences by multi-wavelength observations. *Publ. Astron. Soc. Japan*. 2020. Vol. 72, iss. 5. 71. DOI: [10.1093/pasj/psaa014](https://doi.org/10.1093/pasj/psaa014).

Smilde A.K., Bro R., Geladi P. Multi-way analysis: applications in the chemical sciences. *John Wiley & Sons*. 2005.

Wild J.P. The radio-frequency line spectrum of atomic hydrogen and its applications in astronomy. *Astrophys. J.* 1952. Vol. 115, p. 206. DOI: [10.1086/145533](https://doi.org/10.1086/145533).

Zirin H., Baumert B.M., Hurford G.J. The microwave brightness temperature spectrum of the quiet sun. *Astrophys. J.* 1991. Vol. 370. P. 779–783. DOI: [10.1086/169861](https://doi.org/10.1086/169861).

Статья подготовлена по материалам Девятнадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 5–9 февраля 2024 г., ИКИ РАН, Москва.

Как цитировать эту статью:

Овчинникова Н.Е., Богод В.М., Лебедев М.К. Наблюдение в радиодиапазоне линии поглощения гидроксила (OH) в волокнах и протуберанцах над активными областями Солнца. *Солнечно-земная физика*. 2024. Т. 10, № 3. С. 21–26. DOI: [10.12737/szf-103202403](https://doi.org/10.12737/szf-103202403).