

РЕКОМБИНАЦИОННЫЕ РАДИОЛИНИИ НА СОЛНЦЕ

© 2022 г. А. Ф. Дравских^{1, *}, Ю. А. Дравских¹

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Санкт-Петербургский филиал, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: dedalfed@mail.ru

Поступила в редакцию 14.12.2021 г.

После доработки 21.02.2022 г.

Принята к публикации 21.02.2022 г.

Линии, наблюдаемые в астрономических объектах, позволяют получать уникальную информацию о них. В настоящее время в спектре Солнца обнаружена только одна радиолиния тонкой структуры водорода $2^2P_{3/2}-2^2S_{1/2}$ на частоте 9845 МГц (3.05 см). Найдено также, что в спектре солнечных активных образований над пятнами с большой вероятностью наблюдаемы еще две линии тонкой структуры водорода: $3^2P_{3/2}-3^2S_{1/2}$ и $3^2D_{3/2}-3^2P_{1/2}$ на частотах 2917 и 3237 МГц (10.28 и 9.27 см). Анализ многолетних спектральных наблюдений Солнца на радиотелескопе РАТАН-600 показал, что в спектре солнечных активных образований над пятнами должны наблюдаться многочисленные рекомбинационные радиолинии водорода и других элементов.

Ключевые слова: солнечное радиоизлучение, спектр радиоизлучения активных образований над солнечными пятнами, профили Пашена-Бака водородных рекомбинационных радиолиний, нейтральный водород над солнечными пятнами, перспективы наблюдения рекомбинационных радиолиний в спектре Солнца

DOI: 10.31857/S0004629922060032

1. ВВЕДЕНИЕ

Наблюдения на радиотелескопе РАТАН-600 показали [1], что в спектре излучения Солнца наблюдается радиолиния $2^2P_{3/2}-2^2S_{1/2}$ на частоте 9845 МГц (3.05 см), связанная с переходами в тонкой структуре атома водорода, возбужденного до уровня с главным квантовым числом $n = 2$. Это пока единственная радиолиния, наблюдаемая в спектре Солнца в сантиметровом диапазоне. Впервые на возможность наблюдений Солнца в радиолинии $H_{3.05}$ указал в 1952 г. Wild [2]. Уже в 1958 г. наблюдение Солнца во время затмения показало потемнение диска Солнца к краю на частоте линии 9845 МГц. В дальнейшем были обнаружены признаки присутствия линии во всплесках радиоизлучения Солнца [3, 4], обнаружено ее присутствие на Солнце с помощью радиотелескопа диаметром 3 м, и получен ее частотный профиль, хорошо совпадающий с теоретическим [5]. По наблюдениям на радиотелескопе РАТАН-600 (Р-600) также сообщалось о возможном присутствии на Солнце этой линии [6–8]. Наконец, после расчета зеемановского расщепления для этой линии и его применения для обработки наблюдений было надежно установлено, что интенсивность этой линии на участках спокойного Солнца составляет ~1% от фона, а в активных образованиях над пятнами (АО) – 10 и более процентов от

фона АО, где она наблюдается в поглощении [1]. В работе [9] показано, что в спектре излучения АО над пятнами могут наблюдаться в поглощении еще две радиолинии тонкой структуры водорода для $n = 3$ (2917 МГц, 10.28 см) и (3237 МГц, 9.27 см). В работе замечено, что обилие атомов нейтрального водорода над АО возрастает с ростом высоты над фотосферой. Следовательно, в АО может наблюдаться серия более длинноволновых радиолиний тонкой структуры для главных квантовых чисел $n = 3, 4, \dots$, имеющих меньшие вероятности спонтанных переходов. Наличие нейтрального водорода над пятнами подтверждено наблюдениями на инфракрасном спектрополяриметре [10].

Физические условия над пятнами, выявленные в наблюдениях и исследованиях в статьях [1, 9, 10], приводят к заключению о возможности наблюдения в АО и рекомбинационных радиолиний водорода и других элементов.

Спектральный комплекс радиотелескопа Р-600, обладающий большим диапазоном анализируемого спектра (3–18 ГГц), к сожалению, имеет весьма низкое спектральное разрешение (84 канала шириной ~120 МГц, расставленных через 187.5 МГц [11]). Рекомбинационные линии водорода в этом диапазоне (для главных квантовых чисел $n > 20$) имеют ничтожную естественную

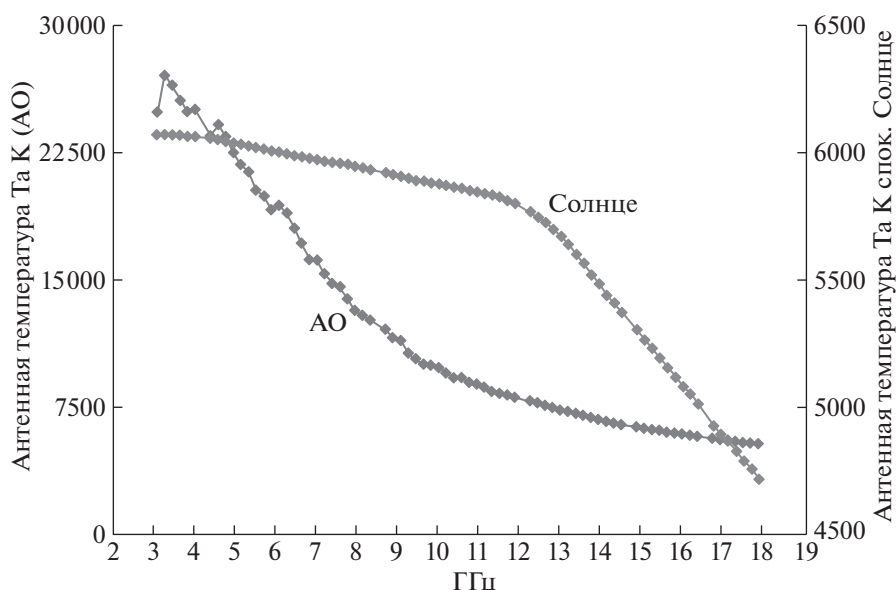


Рис. 1. Средние спектры излучения 31 АО и 30 – спокойного Солнца.

ширину [12]. То есть, спектральный комплекс Р-600 не пригоден для наблюдения профилей рекомбинационных радиолиний. Однако анализ данных многолетних спектральных наблюдений Солнца на Р-600 позволяет сделать вывод о том, что рекомбинационные радиолинии в спектрах АО наблюдаемы. Решающим основанием для такого заключения является очень высокий уровень неоднородности спектров всех АО по сравнению с таковым для спокойного Солнца.

2. НЕОДНОРОДНОСТИ СПЕКТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ АКТИВНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ НАД ПЯТНАМИ И СПОКОЙНОГО СОЛНЦА

В настоящей работе все спектры АО относятся к максимумам их интенсивности. На рис. 1 показаны средние спектры излучения 31 АО и 30 – спокойного Солнца. Легко видеть, что эти спектры имеют разную степень гладкости. В дальнейшем мы будем использовать средний из 30 спектров спокойного Солнца как некий стандартный спектр спокойного Солнца.

Чтобы оценить различия в неоднородностях спектров этих объектов, исключим из спектров средние значения. На рис. 2 показан процесс исключения среднего значения спектра на примере АО 12673. Неоднородностью спектра назовем разность между спектром и аппроксимирующей кривой (в данном случае полиномом 5-й степени). Неоднородность представлена на рис. 3.

На рис. 4 показана эта неоднородность в процентах к средней интенсивности АО, а на рис. 5 – неоднородность в процентах к средней интенсивности при условии, что из интенсивности АО ис-

ключена доля, относящаяся к спокойному Солнцу (сС). Соотношение процентов неоднородностей спектров АО 12673 и сС показано на рис. 6. Среднеквадратические значения неоднородностей спектров этих объектов σ отличаются почти в 20 раз, они составляют, соответственно, 4.55 и 0.228%.

Столь большое преобладание неоднородности спектра АО над таковым для спокойного Солнца указывает на наличие некоего когерентного механизма генерации этих неоднородностей в АО. На рис. 7 приведены неоднородности средних спектров двух групп АО по 10 АО в каждой группе. В одной из групп все АО более мощные, чем во второй группе. Коэффициент корреляции этих кривых составляет 0.915, что указывает на устойчивость этого когерентного механизма генерации излучения.

На рис. 8 представлены среднеквадратические значения неоднородностей спектров целого ряда АО, имеющих разные интенсивности. Видно, что всем им присущ большой уровень неоднородности спектра.

3. РЕКОМБИНАЦИОННЫЕ РАДИОЛИНИИ ВОДОРОДА И ДРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ МОГУТ БЫТЬ ПРИЧИНОЙ ВЫСОКОГО УРОВНЯ НЕОДНОРОДНОСТИ СПЕКТРА РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ АКТИВНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ НАД СОЛНЕЧНЫМИ ПЯТНАМИ

Наиболее известные рекомбинационные линии Солнца – водородные серии Лаймана (ультрафиолет), Бальмера (видимый диапазон), Па-

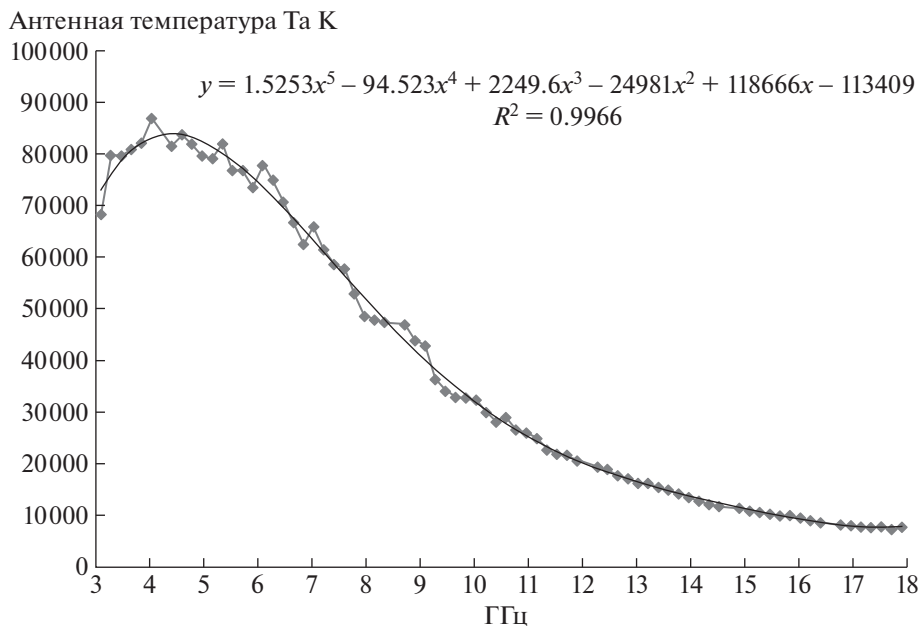


Рис. 2. Спектр АО 12673, аппроксимированный полиномом 5-й степени.

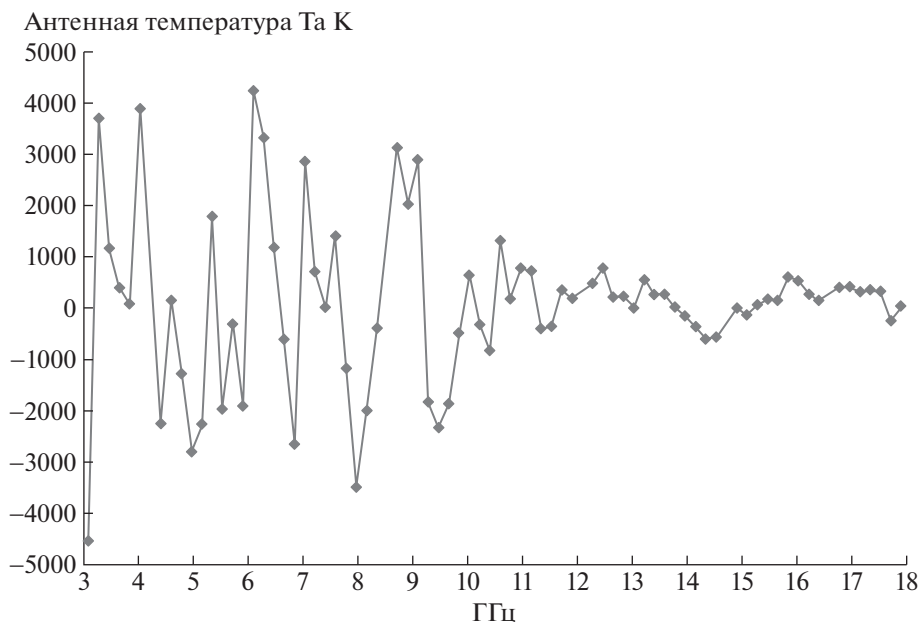


Рис. 3. Неоднородность спектра АО 12673.

шена (инфракрасный) и т.д. Рекомбинационным радиолиниям (РРЛ) посвящена превосходная монография [12]. РРЛ в межзвездной среде предсказаны в 1959 г. Кардашевым [13] и обнаружены в 1964 г. А.Ф. Дравских, З.В. Дравских [14] ($H10\alpha$), а также Сороченко и Бороздичем [15] ($H90\alpha$). В разреженной межзвездной среде РРЛ заполняют весь радиодиапазон от субмиллиметров до дециметров, что соответствует возбужде-

нию до главного квантового уровня $n = 1000$. В излучении Солнца обнаружено несколько РРЛ различных элементов на чрезвычайно высоких частотах. Наиболее низкочастотная из обнаруженных в излучении хромосферы РРЛ, принадлежащая водороду, $H21\alpha$, имеет частоту 662 ГГц [16].

Частоты РРЛ водорода и других водородоподобных элементов (возбужден только один внеш-

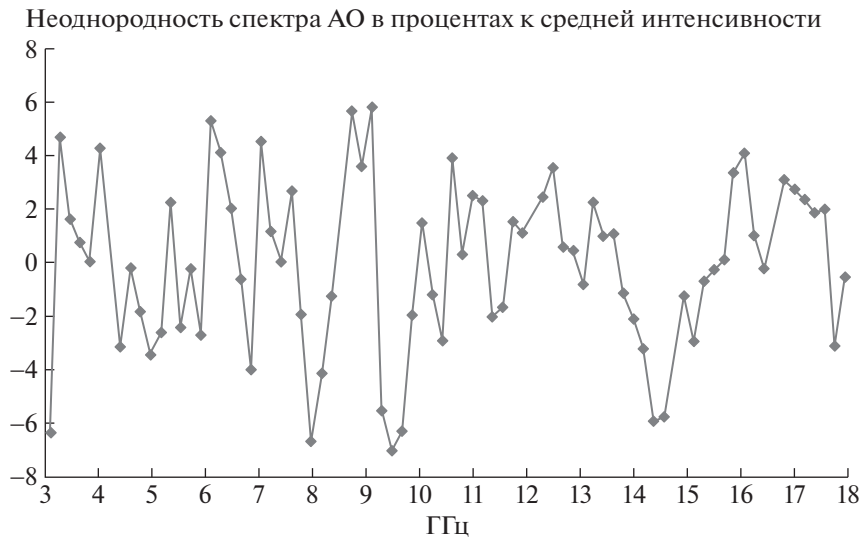


Рис. 4. Неоднородность спектра АО 12673 в процентах к средней интенсивности.



Рис. 5. Неоднородность спектра АО 12673 в процентах к средней интенсивности, из которой исключено спокойное Солнце.

ний электрон) отличаются очень мало. В диапазоне частот спектрального комплекса Р-600 это различие не превосходит 10 МГц. Это значит, что РРЛ водорода и любых других элементов будут попадать в один и тот же частотный канал спектрографа Р-600. Однако частоты РРЛ ионов для тех же n будут существенно различаться.

В работе [1] неожиданно обнаружилось, что радиолиния тонкой структуры водорода $2^2P_{3/2} - 2^2S_{1/2}$ (9845 МГц) наблюдается в спектре АО над пятнами с большой интенсивностью в поглоще-

нии. В работе [9] показано, что с большой вероятностью в АО должны наблюдаться еще две линии тонкой структуры водорода на частотах 2917 и 3237 МГц. Все это указывает на недостаточное знание условий, существующих в АО над пятнами. Требуется объяснения и наличие огромной неоднородности спектров в АО по сравнению с таковой для спокойного Солнца. Трудно представить, что спокойные механизмы генерации излучения, тормозной и гиромангнитный, могут быть причиной такой неоднородности спектра

Неоднородности спектров АО 17863 и спокойного Солнца
в процентах к их средним интенсивностям

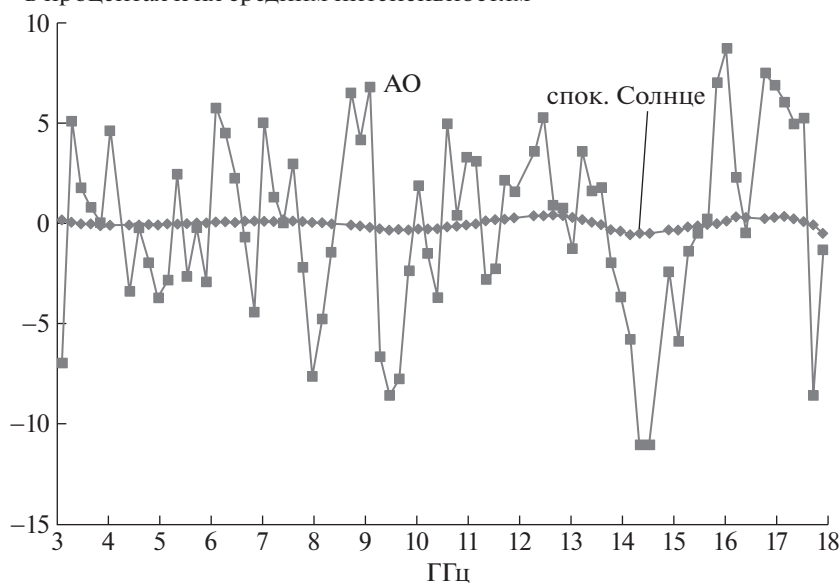


Рис. 6. Неоднородности спектров АО 12673 и спокойного Солнца в процентах к их интенсивностям.

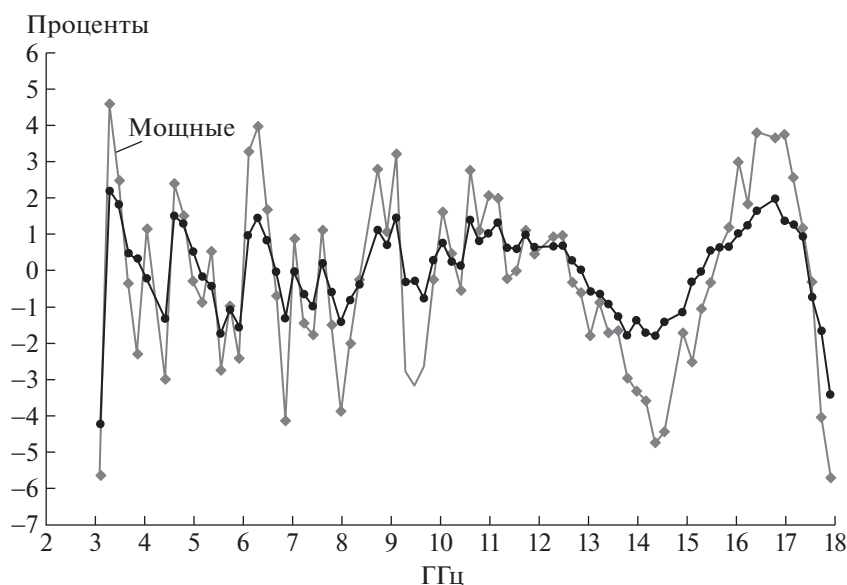


Рис. 7. Сравнение неоднородностей средних спектров двух групп АО, по 10 АО в каждой группе.

АО. Учитывая недостаточность знаний параметров среды в АО над пятнами, можно допустить наличие РРЛ водорода и других элементов в спектрах АО. РРЛ распределены по спектру дискретно и при достаточной интенсивности могут быть искомым источником неоднородности спектров.

Оценим, при каких параметрах среды в АО возможно образование РРЛ, предположительно создающих столь большую неоднородность спектра АО. Температура T среды над пятнами состав-

ляет 4300–5500 К [17]. Эта частично ионизованная среда поднимается от фотосферы в корону. В пятне присутствует достаточно сильное магнитное поле, препятствующее проникновению в эту среду горячей плазмы короны. Плотность среды у основания пятна известна плохо. При подъеме в корону меняется форма магнитного поля, замагниченный объем среды растет, плотность среды падает.

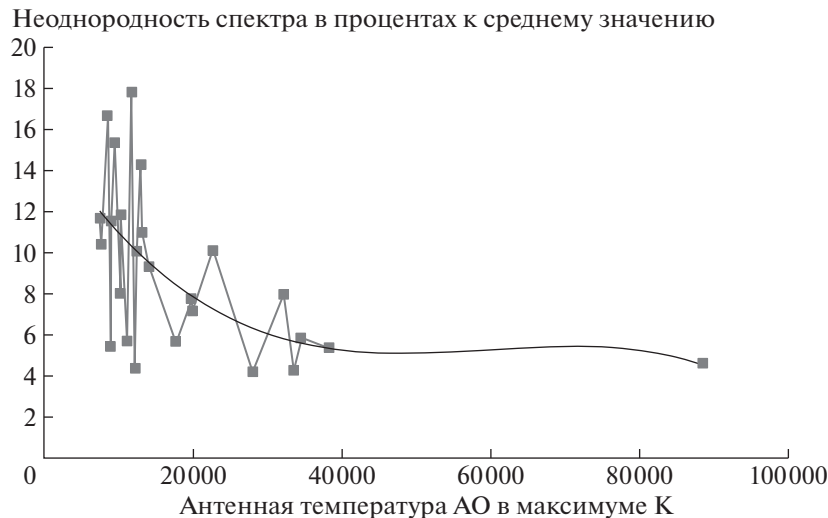


Рис. 8. Среднеквадратические значения неоднородностей спектров ряда АО, имеющих разные интенсивности.

Факторами, мешающими образованию эффекта, являются доплеровское и штарковское уширения РРЛ. Доплеровское уширение [12], формула (2.18, стр. 36)

$$\Delta v_d \approx 7.16233 \times 10^{-7} \left(\frac{T}{M} \right)^{1/2} v_0, \quad (1)$$

зависит от отношения T/M , где M — масса элемента в атомных единицах массы (для преобладающего элемента, водорода, $M = 1.007825035$), T — температура в Кельвинах, v_0 — частота линии. Для водорода при $T = 30000$ К и $v_0 = 8$ ГГц $\Delta v_d = 0.99$ мегагерца. Как мы увидим в дальнейшем, это малая величина по сравнению со штарковским уширением.

Основным механизмом штарковского уширения РРЛ [12] являются неупругие соударения возбужденных атомов с электронами (формула (2.49, стр. 50))

$$\Delta v_s \approx \frac{5.16 \times 10^{-6} N_e n^4}{\sqrt{T_e}} \ln(8.25 \times 10^{-6} T_e n), \quad (2)$$

где N_e — электронная плотность в см^3 , n — квантовое число (уровень возбуждения), T_e — электронная температура. Обратим внимание, что штарковское уширение (ШУ) пропорционально уровню возбуждения n более чем в 4-й степени. Это значит, что РРЛ не видны в хромосфере потому, что при высокой электронной плотности в хромосфере ШУ их размывает и делает необнаруживаемыми.

Поскольку неоднородность спектров в АО наблюдается во всем РАТАНовском диапазоне, попробуем выяснить, при каких значениях электронной плотности N_e это возможно. На рис. 9 показаны распределение РРЛ водорода в

РАТАНовском диапазоне частот (вверху) и плотность их распределения (внизу).

Каждая рекомбинационная линия (любого элемента) имеет тонкую структуру (т.е. расщеплена). Однако расщепление линий, обусловленное тонкой структурой термов, при высоких значениях главных квантовых чисел n (от 70 до 130) составляет ничтожную величину ($\sim 1/n^3$), от 100 герц до 5 герц [12]. Именно эти уровни n при переходах типа $(n+1) \rightarrow n$ обеспечивают частоты РРЛ, лежащие в РАТАНовском диапазоне. Зеемановское расщепление при тех магнитных полях, которые наблюдаются в АО (~ 100 гаусс и более) [1, 9], будет на много порядков превосходить расщепление, связанное с тонкой структурой термов. В таком случае расщепление линий в магнитном поле будет подчиняться эффекту Пашена-Бака [18], т.е. в магнитном поле линии будут расщепляться на три компонента. В качестве исходной линии, которая будет расщепляться в соответствии с эффектом Пашена-Бака, мы принимаем сигнал, представляющий собой тесные компоненты, расщепленные в связи с тонкой структурой термов. Частота этого сигнала может быть положена равной частоте рекомбинационной линии в отсутствие магнитного поля. В этом случае расщепление исходной линии будет происходить по формуле (1), [18], стр. 331

$$\Delta v = \pm \frac{1}{4\pi C} \left(\frac{e}{m_e} \right) H, \quad (3)$$

где C — скорость света, e — заряд электрона, m_e — масса электрона, $\Delta v = \pm 1.3996 \cdot H$, где Δv — в мегагерцах, H — в гауссах.

Частота среднего компонента будет совпадать с исходной линией, а боковые компоненты будут смещены на Δv в противоположные стороны.

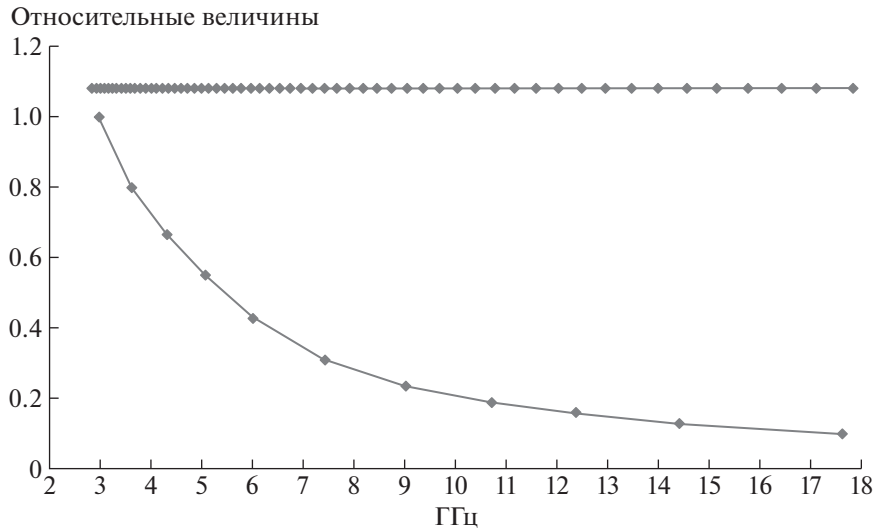


Рис. 9. Плотность распределения РРЛ водорода в диапазоне спектрографа РАТАН-600.

Средний компонент будет линейно поляризован вдоль магнитного поля, а боковые — поляризованы по кругу в противоположных направлениях.

На рис. 10 показана модель неоднородности спектра вместе с реальной неоднородностью АО 12673. Для создания модели использованы РРЛ водорода и некоторая закономерность распределения магнитного поля с высотой над фотосферой, а также форма частотной характеристики каналов спектрографа. Модель и реальная неоднородность не совпадают. Это естественно, поскольку не учтены РРЛ других элементов и их ионов.

4. ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ СРЕДЫ НАД АО

РРЛ закономерно распределены по всему спектру частот. Основным фактором, ограничивающим возможность наблюдения РРЛ в солнечных условиях, является штарковское уширение (ШУ) линий, связанное с неупругими соударениями высоковозбужденных атомов с электронами [12].

Если ШУ будет настолько сильно размывать РРЛ, что соседние линии будут сливаться, то наблюдаемая на Р-600 неоднородность спектра исчезнет. Пусть критерием максимально допустимого размыва двух соседних линий будет ситуация, когда между двумя соседними линиями интенсивность становится равной 0.5 интенсивности линий. Для вычисления профиля линий РРЛ использовано уравнение (2.24, стр. 40) [12]

$$f(\nu) = \frac{2\delta\nu}{\pi \left[4(\nu - \nu_0)^2 + (\delta\nu)^2 \right]}, \quad (4)$$

где ν_0 — центральная частота линии, $\delta\nu$ — полуширина линии. Так как естественная ширина РРЛ и их доплеровское уширение малы, то, при наличии штарковского уширения, $\delta\nu$ с большой точностью равно ШУ.

На рис. 11 показан пример принятого нами предельно допустимого уширения двух соседних РРЛ. Поскольку расстояние между соседними РРЛ зависит от их положения в спектре, то нужно будет провести оценку допустимого уширения и соответствующей N_e на низкочастотном (нч) и высокочастотном (вч) краях диапазона спектрографа Р-600. Чтобы образовалась такая конфигурация, необходимо, чтобы $\delta\nu = \text{ШУ}$ на нч крае составляло 45 МГц, а на вч крае — 450 МГц.

Из уравнения (2.49, стр. 50) [12] получено выражение (5) зависимости электронной плотности среды N_e от параметров среды и величины ШУ:

$$N_e \approx \frac{\delta\nu \sqrt{T_e}}{5.16 \times 10^{-6} n^4 \ln(8.25 \times 10^{-6} T_e n)}, \quad (5)$$

где n — главное квантовое число (уровень возбуждения), T_e — электронная температура. N_e слабо зависит от T_e . Положим $T_e = 5000$ К, тогда для нч края ($n = 127$), $N_e = 1.4 \times 10^6 \text{ см}^{-3}$, а для вч края ($n = 72$) $N_e = 2.5 \times 10^8 \text{ см}^{-3}$.

Поскольку большие неоднородности спектров АО наблюдаются во всем диапазоне спектральных наблюдений Р-600 и поскольку мы полагаем, что ответственными за эти неоднородности являются РРЛ, то мы должны выбрать меньшую из полученных N_e и считать, что электронная концентрация среды над АО достигает столь малой величины, как $N_e = 1.4 \times 10^6 \text{ см}^{-3}$.

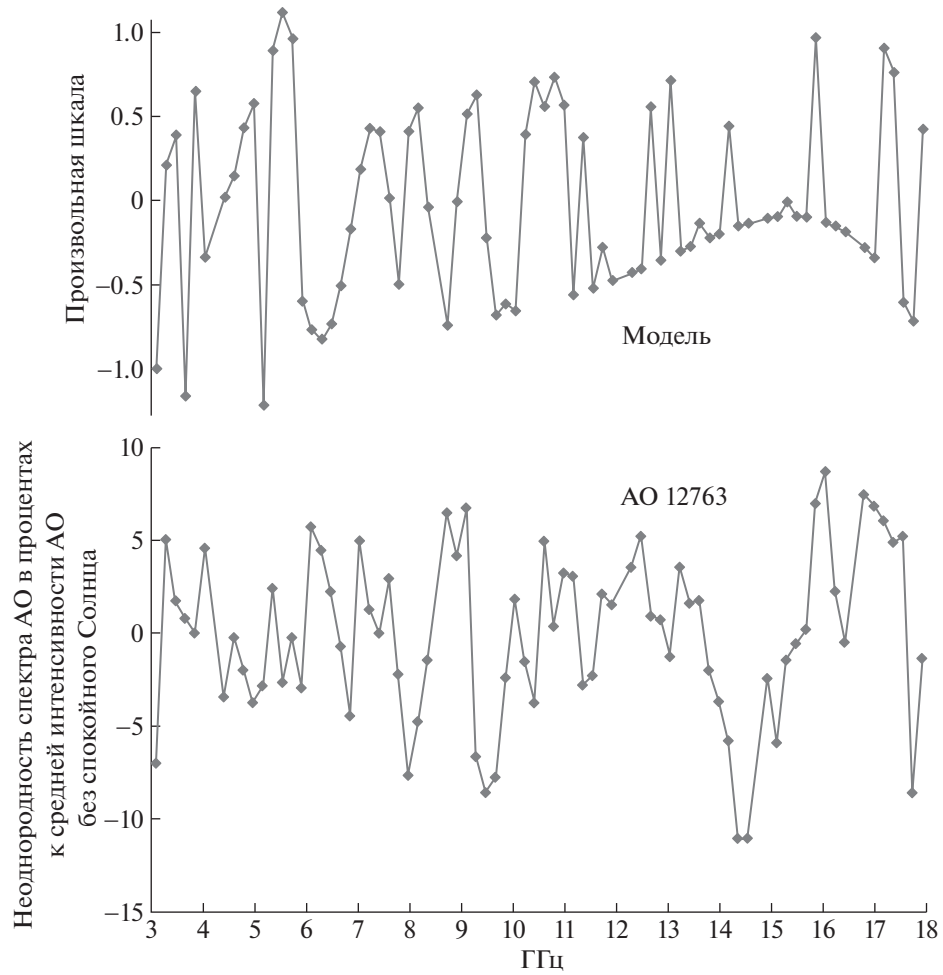


Рис. 10. Неоднородность спектра АО12673 и ее модель из РРЛ водорода.

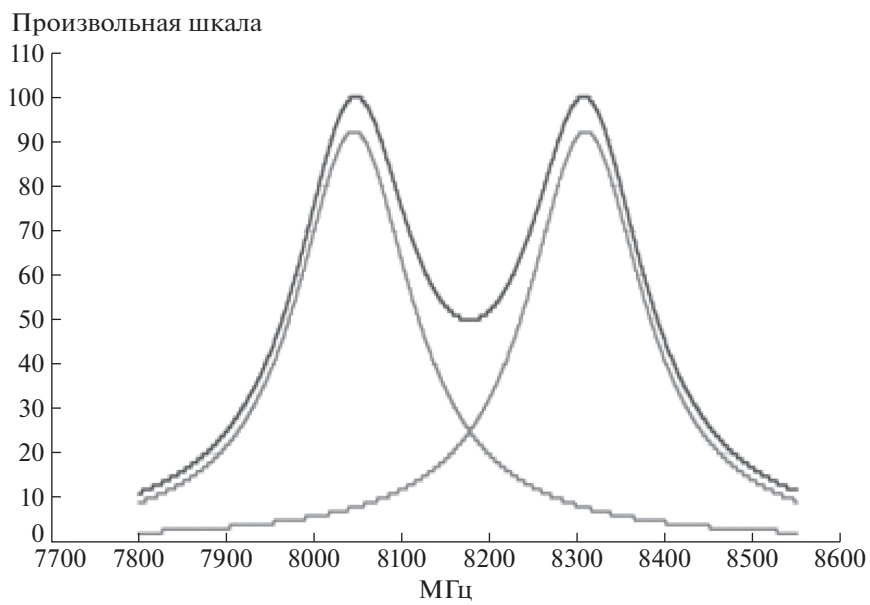


Рис. 11. Принятое предельно допустимое уширение соседних РРЛ.

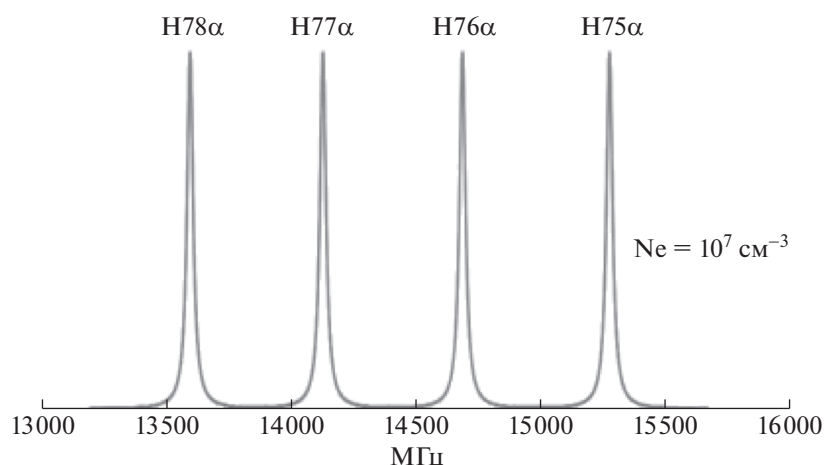


Рис. 12. Профили РРЛ водорода в области частот 13–16 ГГц.

5. ДИСКУССИЯ

Проведено много попыток обнаружения рекомбинационных радиолиний (РРЛ) в излучении хромосферы Солнца [12]. Все обнаруженные на Солнце РРЛ лежат в области чрезвычайно высоких частот. Наиболее низкочастотная из обнаруженных в излучении хромосферы РРЛ, принадлежащая водороду, $H21\alpha$, имеет частоту 662 ГГц [16].

Херсонский и Варшалович [19] указывали на возможность обнаружения РРЛ на более низких частотах в излучении солнечных пятен. В настоящей работе нет очевидных фактов, указывающих на наблюдаемость РРЛ в спектрах АО над солнечными пятнами. Однако есть совокупность данных, которые трудно объяснить, не привлекая к рассмотрению РРЛ. Эти данные таковы:

1) В АО обнаружена очень яркая линия поглощения тонкой структуры водорода (9845 МГц, 3.05 см) [1], которую никто не смог предсказать.

2) На основании особенностей спектра АО на частотах ~ 3 ГГц появилось предсказание о вероятной наблюдаемости еще двух ярких линий поглощения тонкой структуры водорода в АО на частотах 2917 и 3237 МГц (10.28 см) и (9.27 см) [9], которые по физическим соображениям невозможно наблюдать в стандартной атмосфере хромосферы из-за очень малого значения их вероятности спонтанного перехода [2]. Это показывало, что параметры среды над АО пока известны плохо, что в АО должно быть много нейтрального водорода, относительное обилие которого с высотой возрастает.

3) Действительно, в работе [10] по результатам наблюдений на инфракрасном спектрополяриметре была предложена схема образования холодного атомарного водорода в атмосфере над солнечными пятнами.

4) Наконец, основным фактором, побудившим рассмотреть возможность наблюдаемости РРЛ в спектрах АО, стала чрезвычайно высокая степень неоднородности спектров АО по сравнению с таковой спектра спокойного Солнца. Оказалось, что с помощью РРЛ можно объяснить эту особенность спектров АО.

Для обнаружения РРЛ в солнечных пятнах нужен полноповоротный радиотелескоп (диаметром ~ 30 м) и спектрограф умеренных параметров: полоса анализа от 1000 до 3000 МГц, разрешающая способность ~ 1 МГц, шумовая температура 300 К. Полоса анализа должна быть в области достаточно высоких частот. Если рассматривать диапазон Р-600, то полосу анализа следует выбрать от 13 до 16 ГГц по следующим соображениям. В этой области, судя по результатам настоящей работы, наибольшая неоднородность спектра АО, штарковское уширение здесь невелико (при $N_e = 10^7 \text{ см}^{-3}$ $\delta\nu \approx 29$ МГц), здесь должны присутствовать 4 РРЛ водорода ($H78\alpha$ – $H75\alpha$) (рис. 12) и других водородоподобных атомов, а также их ионов. Расстояние между соседними РРЛ достаточно велико (560 МГц). Поскольку в АО присутствует магнитное поле, то там же будут наблюдаться и компоненты расщепления РРЛ эффектом Пашена-Бака. Положение в спектре исходных РРЛ от магнитного поля не зависит.

6. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Работы [1, 9, 10] показали, что в активных образованиях над солнечными пятнами (АО) присутствует достаточно много нейтрального водорода.

1) Анализ многолетних спектральных наблюдений Солнца на радиотелескопе РАТАН-600 показал, что во всех активных образованиях (АО)

над пятнами неоднородность (негладкость) спектра превышает таковую для спокойного Солнца примерно в 20 раз. Спектры самих неоднородностей спектра АО устойчивы, т.е. между спектрами неоднородностей разных АО существует высокий коэффициент корреляции (>0.9). Все это указывает на наличие некоего механизма генерации когерентного излучения в АО, порождающего высокую неоднородность спектра.

2) Показано, что таким механизмом могут быть рекомбинационные радиолинии (РРЛ) водорода и других элементов.

3) Показано, что электронная плотность среды над АО, в которой генерируются РРЛ, должна достигать столь малой величины, как $N_e = 1.4 \times 10^6 \text{ см}^{-3}$. При этом должны наблюдаться низко-частотные РРЛ вплоть до H128 α (3099 МГц).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. Ф. Дравских, Н. Г. Петерова, Н. А. Топчило, Астрон. журн. **96**, 246 (2019).
2. J. P. Wild, Astrophys. J. **115**, 206 (1952).
3. А. Ф. Дравских, Известия ГАО **164**, 128 (1960).
4. А. Ф. Дравских, Известия ГАО **172**, 40 (1964).
5. А. Ф. Дравских, З. В. Дравских, Астрон. журн. **65**, 199 (1988).
6. Н. А. Топчило, Н. Г. Петерова, Т. П. Борисевич, Астрон. журн. **87**, 75 (2010).
7. V. M. Bogod, L. V. Yasnov, Solar Phys. **291**, 3317, (2016).
8. C. Alissandrakis, V. Bogod, T. Kaltman, and N. Peterova, CESRA 2016: Solar Radio Physics from the Chromosphere to Near Earth. WG 3: Fine structures and radio wave propagation (2016).
9. А. Ф. Дравских, Ю. А. Дравских, Астрон. журн. **98**, 694, (2021).
10. S. A. Jaeggli, H. Lin, and H. Uitenbroek, Astrophys. J. **745**, 133, (2012).
11. В. М. Богод, А. М. Алесин, А. А. Перваков, Астрофиз. бюлл. **66**, 2 (2011).
12. Р. Л. Сороченко, М. А. Гордон Рекомбинационные радиолинии (М.: Физматлит, 2003).
13. Н. С. Кардашев, Астрон. журн. **36**, 813 (1959).
14. А. Ф. Дравских, З. В. Дравских, Астрон. цирк., вып. 282, 2, (1964).
15. Р. Л. Сороченко, Э. В. Бородзич, Докл. Акад. наук СССР **163**, 603 (1965).
16. T. A. Clark, D. A. Naylor, G. R. Davis, Astron. and Astrophys., **361**, L60, (2000).
17. В. В. Железняков Радиоионизлучение Солнца и планет (М.: Наука, 1964).
18. С. Э. Фриш Оптические спектры атомов (М.: Физматгиз, 1963).
19. В. К. Херсонский, Д. А. Варшалович, Астрон. журн. **57**, 621, (1980).