

УДК 523.98

О ВОЗМОЖНОСТИ НАБЛЮДЕНИЯ РЯДА РАДИОЛИНИЙ ВОДОРОДА В СОЛНЕЧНЫХ АКТИВНЫХ ОБРАЗОВАНИЯХ НАД ПЯТНАМИ

© 2021 г. А. Ф. Дравских^{1, *}, Ю. А. Дравских¹

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

*E-mail: dedalfed@mail.ru

Поступила в редакцию 02.12.2020 г.

После доработки 24.03.2021 г.

Принята к публикации 31.03.2021 г.

Первая радиолиния в излучении Солнца, принадлежащая атомарному водороду, была теоретически обоснована Уайлдом в 1952 г. Ее зеемановский профиль был рассчитан и надежно установлен в излучении участков спокойного Солнца и активных образований над солнечными пятнами в 2018 г. по наблюдениям на радиотелескопе РАТАН-600. Это позволило определить ряд параметров областей, излучающих линию, и оценить магнитные поля в атмосфере Солнца. В настоящей работе мы рассчитываем зеемановский профиль для еще двух радиолиний водорода и показываем, что они могут наблюдаться в активных образованиях над пятнами.

Ключевые слова: солнечное радиоизлучение, спектр радиоизлучения активных образований над солнечными пятнами, зеемановские профили солнечных водородных радиолиний, нейтральный водород над солнечными пятнами, перспективы наблюдения радиолиний в спектре Солнца

DOI: 10.31857/S0004629921080041

1. ВВЕДЕНИЕ

Наблюдения на радиотелескопе РАТАН-600 показали [1], что в спектре излучения Солнца присутствует радиолиния $2^2P_{3/2}-2^2S_{1/2}$ на частоте 9845 МГц (3.05 см)¹, связанная с переходами в сверхтонкой структуре атома водорода, возбужденного до уровня с главным квантовым числом $n = 2$. Это пока единственная радиолиния, наблюдаемая в излучении Солнца. Впервые на возможность наблюдений Солнца в радиолинии $H_{3.05}$ указал в 1952 г. J.P. Wild [2]. Уже в 1958 г. наблюдение солнечного 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] с помощью радиотелескопа диаметром 3 м и получен ее частотный профиль, хорошо совпадающий с теоретическим [5]. По наблюдениям на радиотелескопе РАТАН-600 также сообщалось о возможном присутствии этой линии в солнечных активных образованиях (АО) [6–8]. Наконец, исходя из расчетов зеемановского расщепления и обработки наблюдений,

было надежно установлено, что интенсивность этой линии на участках спокойного Солнца составляет ~1% от фона, а в активных образованиях АО – 10 и более процентов от фона АО [1]. Зеемановское расщепление этой линии позволило установить напряженности магнитных полей в наблюдаемых объектах. Был оценен ряд параметров объектов, излучающих эту линию – размеры, время жизни, а также свойство объектов, излучающих линию поглощения, концентрироваться ближе к краям солнечного диска. В работе Уайлда [2] приводятся сведения и о менее перспективных радиолиниях из-за малой вероятности их спонтанных переходов. Это линии водорода для главных квантовых чисел $n = 3$ и 4, подобные радиолинии $2^2P_{3/2}-2^2S_{1/2}$.

Однако обнаруженная в наблюдениях [1] большая интенсивность линии $H_{3.05}$ в активных образованиях над солнечными пятнами существенно увеличила надежду на возможность обнаружения в АО этих “бесперспективных” радиолиний. И действительно, в радиоспектрах АО были обнаружены еще две радиолинии для $n = 3$. Далее будут представлены параметры двух этих новых радиолиний $3^2P_{3/2}-3^2S_{1/2}$ и $3^2D_{3/2}-3^2P_{1/2}$.

¹ Если быть более точными, то частоту максимума триплета $2^2P_{3/2}-2^2S_{1/2}$ следует считать равной 9845 МГц (3.05 см), а не 9850 МГц (3.04 см), как в [1].

Таблица 1. Линии тонкой структуры для $n = 2, 3, 4$, согласно теории Дирака

Обозначение	Частота (МГц)	Вероятность перехода (s^{-1})	Естественная полуширина (МГц)
$2^2P_{3/2}-2^2S_{1/2}$	10944	8.9×10^{-7}	100
$3^2P_{3/2}-3^2S_{1/2}$	3243	1.4×10^{-7}	30
$3^2D_{3/2}-3^2P_{1/2}$	3243	8.7×10^{-8}	40
$3^2D_{5/2}-3^2P_{3/2}$	1081	3.9×10^{-9}	40
$4^2P_{3/2}-4^2S_{1/2}$	1368	3.5×10^{-8}	13.6
$4^2D_{3/2}-4^2P_{1/2}$	1368	2.8×10^{-8}	17.2
$4^2D_{5/2}-4^2P_{3/2}$	456	1.2×10^{-9}	17.2
$4^2F_{5/2}-4^2D_{3/2}$	456	7.2×10^{-10}	6.6
$4^2F_{7/2}-4^2D_{5/2}$	228	9.6×10^{-11}	6.6

2. РАСЧЕТ ЗЕЕМАНОВСКОГО ПРОФИЛЯ ВОДОРОДНЫХ РАДИОЛИНИЙ $3^2P_{3/2}-3^2S_{1/2}$ И $3^2D_{3/2}-3^2P_{1/2}$

В табл. 1, взятой из [2], показаны разрешенные переходы в тонкой структуре термов атома водорода для главных квантовых чисел $n = 2, 3$ и 4 в соответствии с теорией Дирака.

Там же приведены вероятности спонтанных переходов для линий и их полуширины. Частоты всех приведенных линий тонкой структуры даны без учета сдвига Лэмба, дополняющего теорию Дирака [9], и без учета сверхтонкой структуры термов. Из приведенных линий лэмбовский сдвиг (ЛС) измерен только для $n = 2$, он равен -1062 МГц. Его учет в [2] приводит к линии-триплету $2^2P_{3/2}-2^2S_{1/2}$ на частоте 9845 МГц, состоящей из трех линий сверхтонкой структуры. ЛС для терма $3^2S_{1/2}$ можно вычислить, просто учитывая, что энергия сдвига обратно пропорциональна n^3 [10]. Приведенная ниже формула (1) получена из формулы (123.18) из [10] путем добавления в знаменатель постоянной Планка h , поскольку энергия $E = h\nu$:

$$\delta\nu_{n0} = \frac{4mc^2 Z^4 a^5}{3\pi n^3 h} \left[\ln \frac{1}{(Za)^2} + L_{n0} + \frac{19}{30} \right]. \quad (1)$$

Числовые значения нескольких величин L_{n0} :

n	$=$	1	2	3	4	∞
L_{n0}	$=$	-2.984	-2.812	-2.768	-2.750	-2.721.

В формуле (1) m – масса электрона, c – скорость света, Z – номер элемента в таблице Менделеева, a – безразмерная постоянная тонкой структуры $\approx 1/137$ [11].

ЛС для терма $3^2S_{1/2}$, вычисленный как величина, обратно пропорциональная кубу главного квантового числа, $-1062(2^3/3^3)$, будет равен $-314.6(6) \approx -315$ МГц. Аналогично для терма $4^2S_{1/2}$ сдвиг будет равен ~ -133 МГц. Однако, если вычислять ЛС для S термов для $n = 2, 3$ и 4 по формуле (1), то они получатся равными $-1040.6, -310$ и -131 МГц. В этих способах вычисления ЛС их величины несколько различаются. Но эксперименты по измерению сдвига достаточно сложны. Для дальнейших рассуждений мы примем ЛС для термов $n^2S_{1/2}$ (где $n = 2, 3, 4$) равными $-1062, -315$ и -133 МГц.

Из табл. 1 видно, что вероятности спонтанных переходов линий с ростом n убывают и обнаружение их в излучении спокойного Солнца бесперспективно. Однако ситуация коренным образом меняется для их обнаружения в излучении АО. Интенсивности наблюдаемой линии $2^2P_{3/2}-2^2S_{1/2}$ относительно фона в спектрах АО оказываются на порядок выше, чем в излучении спокойного Солнца. Отсюда можно сделать вывод о том, что на радиотелескопе РАТАН-600 могут быть (при наличии определенного магнитного поля) наблюдаемы в АО еще две радиолинии $3^2P_{3/2}-3^2S_{1/2}$ и $3^2D_{3/2}-3^2P_{1/2}$.

На рис. 1 показаны схемы термов для линии $3^2P_{3/2}-3^2S_{1/2}$ тонкой и сверхтонкой структуры: (а) тонкой структуры без учета ЛС, (б) с учетом ЛС, (в) с учетом ЛС и сверхтонкой структуры. Сверхтонкое расщепление термов вычисляется по формулам 7 и 9 из [2]. Здесь же стрелками показаны разрешенные переходы между термами сверхтонкой структуры.

Линия $3^2P_{3/2}-3^2S_{1/2}$ представляет собой триплет с частотами компонентов $2917.7, 2910.5$ и 2963 МГц. Аналогичные вычисления для линии $3^2D_{3/2}-3^2P_{1/2}$ дают следующее. Лэмбовский сдвиг,

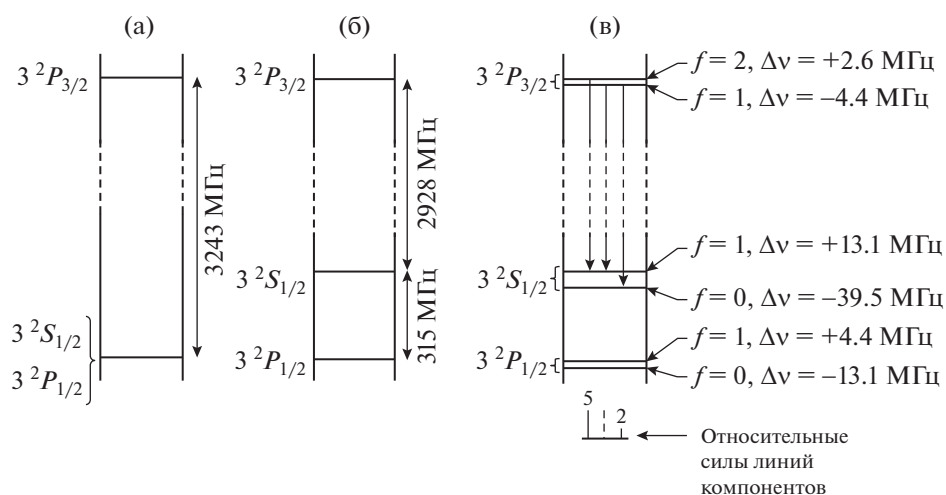


Рис. 1. Структура термов для $n = 3$ атома водорода: а) схема теории Дирака; б) она же, скорректированная за счет сдвига Лэмба; в) окончательная схема, учитывающая лэмбовский сдвиг и сверхтонкую структуру термов. Стрелки указывают разрешенные переходы между термами $3^2P_{3/2}$ и $3^2S_{1/2}$. Здесь f – квантовое число полного механического момента с учетом спина ядра.

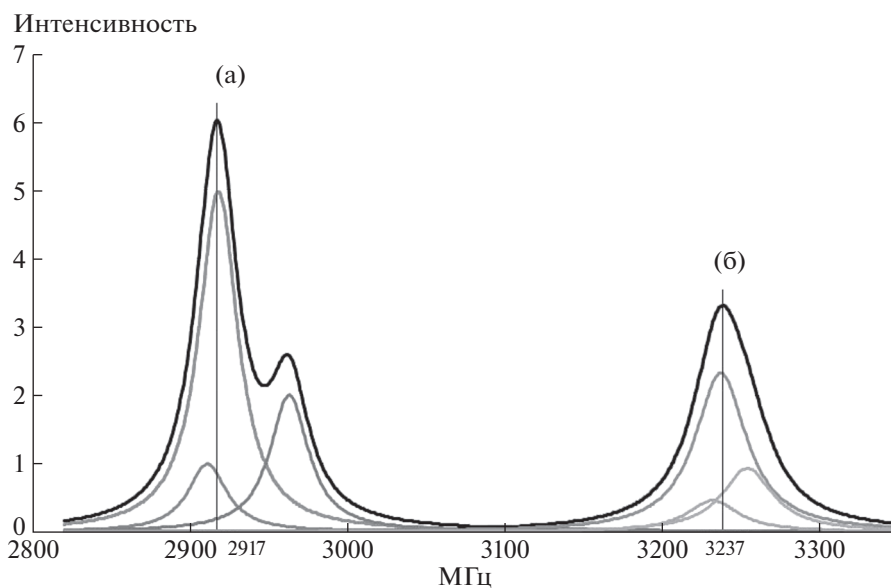


Рис. 2. Профили радиолиний сверхтонкой структуры, триплеты: а) $3^2P_{3/2} - 3^2S_{1/2}$ и б) $3^2D_{3/2} - 3^2P_{1/2}$. Верхние кривые – суммы компонентов в триплетах.

вычисленный по формуле (2), полученной из формулы (123.20) из [10] для случая, когда орбитальный момент электрона для терма ($3^2P_{1/2}$) не равен нулю, получается равным -3.6 МГц. При этом значение $L_{21} = +0.030$. Для $n = 3$ принимаем $L_{31} = L_{21}$:

$$\delta v_{nj} = \frac{4mc^2 Z^4 a^5}{3\pi n^3 h} \left[L_{nl} + \frac{3}{8} \frac{j(j+1) - l(l+1) - 3/4}{l(l+1)(2l+1)} \right], \quad (2) \quad l \neq 0.$$

В результате получается триплет с частотами компонентов 3237, 3232, 3254 МГц. Относительные

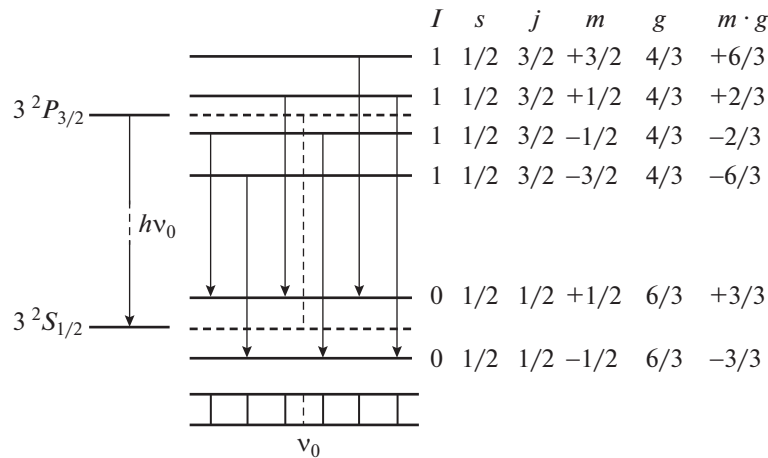


Рис. 3. Схема сверхтонкой структуры термов $n = 3$ атома водорода, расщепленных под влиянием магнитного поля. Стрелками показаны разрешенные переходы.

силы компонентов в триплетях $2^2P_{3/2}-2^2S_{1/2}$, $3^2P_{3/2}-3^2S_{1/2}$ и $3^2D_{3/2}-3^2P_{1/2}$ составляют 5, 1, 2 [12]. Полуширины компонентов в триплетях равны полуширинам линий тонкой структуры. На рис. 2 показаны профили триплетов $3^2P_{3/2}-3^2S_{1/2}$ и $3^2D_{3/2}-3^2P_{1/2}$, состоящих из линий, компонентов сверхтонкой структуры. Профили линий тонкой структуры вычисляются по формуле (3) [2]:

$$f(\nu) = \frac{2}{\pi \delta \nu} \left\{ \frac{1}{1 + [2(\nu - \nu_0)/\delta \nu]^2} \right\}, \quad (3)$$

где ν_0 – центральная частота линии.

Из-за малого лэмбовского сдвига триплет $3^2D_{3/2}-3^2P_{1/2}$ оказался более высокочастотным, чем $3^2P_{3/2}-3^2S_{1/2}$. Профиль линии $3^2P_{3/2}-3^2S_{1/2}$ двугорбый, а профиль $3^2D_{3/2}-3^2P_{1/2}$ – одногорбый с полушириной 47 МГц.

В отсутствие магнитного поля линия $3^2P_{3/2}-3^2S_{1/2}$ находится за пределами спектральных каналов РАТАН-600, а более слабая линия, $3^2D_{3/2}-3^2P_{1/2}$ попадает в один из крайних низкочастотных каналов. При наличии магнитного поля линии будут расщепляться и высокочастотные компоненты этих расщепленных линий могут быть наблюдаемы на радиотелескопе РАТАН-600.

Рассмотрим влияние зеемановского расщепления на возможности наблюдения этих линий на примере линии $3^2P_{3/2}-3^2S_{1/2}$. На рис. 1 показано f – квантовое число полного механического момента с учетом спина ядра, $f = j \pm i = j \pm 1/2$, где j – квантовое число полного механического момента электрона, а $i = \pm 1/2$ – спин ядра. Для определения расщепления радиолинии водорода

$3^2P_{3/2}-3^2S_{1/2}$ в магнитном поле необходимо знать для каждого из взаимодействующих уровней (термов P и S) пять квантовых чисел: n – главное, l – орбитальное, m – магнитное, s – спин электрона и j – квантовое число, учитывающее спин-орбитальное взаимодействие электрона. Из символического представления линии $3^2P_{3/2}-3^2S_{1/2}$ видно, что для верхнего уровня $n = 3, l = 1, j = 3/2$, для нижнего – $n = 3, l = 0, j = 1/2$. Магнитное квантовое число m имеет ряд значений от $+j$ до $-j$, отличающихся на 1. Таким образом, для верхнего уровня $m = 3/2, 1/2, -1/2, -3/2$, для нижнего – $m = 1/2, -1/2$. Спин электрона $s = \pm 1/2$.

Магнитное квантовое число определяет характер расщепления каждого компонента линии в триплете, но, поскольку все квантовые числа (n, l, j, s) у них одинаковы, то и расщепляться они будут одинаково, т.е. профиль расщепленных компонентов останется триплетом, идентичным профилю невозмущенной линии. На рис. 3 показаны термы для $n = 3$, расщепленные в магнитном поле в соответствии со значениями магнитных квантовых чисел m . Здесь g – фактор Ланде [9]. Показаны разрешенные переходы, формирующие расщепленные компоненты линии в соответствии с правилом отбора

$$\Delta m = 0, \pm 1.$$

Видно, что линия расщепляется на шесть компонентов симметрично относительно исходной частоты ν_0 ; при этом на исходной частоте линия отсутствует. Компоненты с $\Delta m = 0$ называются π -компонентами, а остальные – σ -компонентами. Здесь π -компонентами являются два ближайших к ν_0 , симметрично расположенных компонента. Они линейно поляризованы вдоль магнит-

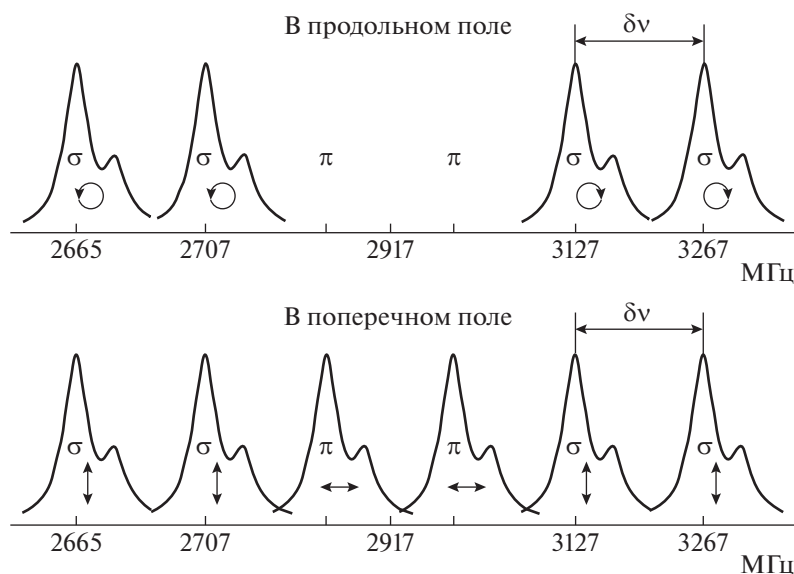


Рис. 4. Примеры зеемановского расщепления триплета $3^2P_{3/2}-3^2S_{1/2}$ в продольном и поперечном магнитных полях величиной ≈ 150 Гс.

ного поля. Остальные две крайние пары компонентов имеют круговую поляризацию разного знака.

На рис. 4 приведены примеры расщепления триплета $3^2P_{3/2}-3^2S_{1/2}$ в продольном и поперечном магнитных полях. Компоненты π в продольном поле отсутствуют, а σ -компоненты противоположно поляризованы по кругу. В поперечном поле присутствуют все шесть компонентов. Они линейно поляризованы: π -компоненты — вдоль поля, а σ -компоненты — перпендикулярно полю.

Для вычисления степени расщепления линии $\delta\nu$ (в мегагерцах) относительно исходной частоты ν_0 в зависимости от напряженности магнитного поля H (в Гауссах), воспользуемся известными формулами [9]:

$$\delta\nu = \mu_B/h[g_2m_2 - g_1m_1]H,$$

где μ_B/h — отношение магнетона Бора к постоянной Планка, $\mu_B/h \approx 1.4$ МГц/Гс, m_2 и m_1 — магнитные квантовые числа верхнего и нижнего уровней, g_2 и g_1 — факторы Ланде для верхнего и нижнего уровней, вычисляемые по формуле

$$g = 1 + [j(j+1) - l(l+1) + s(s+1)]/2j(j+1).$$

Вычисления дают $g_2 = 4/3$, $g_1 = 6/3$, $\delta\nu_1 = \pm 0.4665H$, $\delta\nu_2 = \pm 1.3996H$, $\delta\nu_3 = \pm 2.3327H$. То есть вычисления дают равномерное распределение расщепленных компонентов, пропорциональное напряженности поля:

$$\delta\nu_k \text{ (МГц)} = \pm 0.4665(2k - 1)H,$$

где k — номер компонента, считая от ν_0 . Расстояние между соседними компонентами $\delta\nu$ (МГц) = $= 0.933H$.

Все результаты анализа зеемановского расщепления линии $3^2P_{3/2}-3^2S_{1/2}$ применимы ко всему списку радиолний табл. 1. На рис. 5 показан профиль зеемановского расщепления линий $3^2P_{3/2}-3^2S_{1/2}$ и $3^2D_{3/2}-3^2P_{1/2}$ для ряда поперечных магнитных полей. Поскольку взаимное расположение этих линий в спектре достаточно близкое, то компоненты одной линии при зеемановском расщеплении накладываются на компоненты другой линии при магнитном поле >60 Гс. При этом зеемановский профиль становится очень сложным.

3. НАБЛЮДЕНИЯ СВИДЕТЕЛЬСТВУЮТ О НАЛИЧИИ РАДИОЛИНИЙ $3^2P_{3/2}-3^2S_{1/2}$ И $3^2D_{3/2}-3^2P_{1/2}$ В АКТИВНЫХ ОБРАЗОВАНИЯХ СОЛНЦА

Мы проанализировали наблюдательные материалы АО, полученные на радиотелескопе РАТАН-600 с 21.05.2016 по 28.12.2020.

На рис. 6 показаны низкочастотные края спектров шестнадцати АО. Здесь вертикальная шкала Та К (антенная температура в градусах Кельвина) соответствует только самому интенсивному АО 12673. Набор АО, показанных на рисунке, взят из архива, находящегося в свободном доступе (<http://www.spbf.sao.ru/prognoz/>). Перечень этих АО представлен в табл. 2. Рисунок представлен,

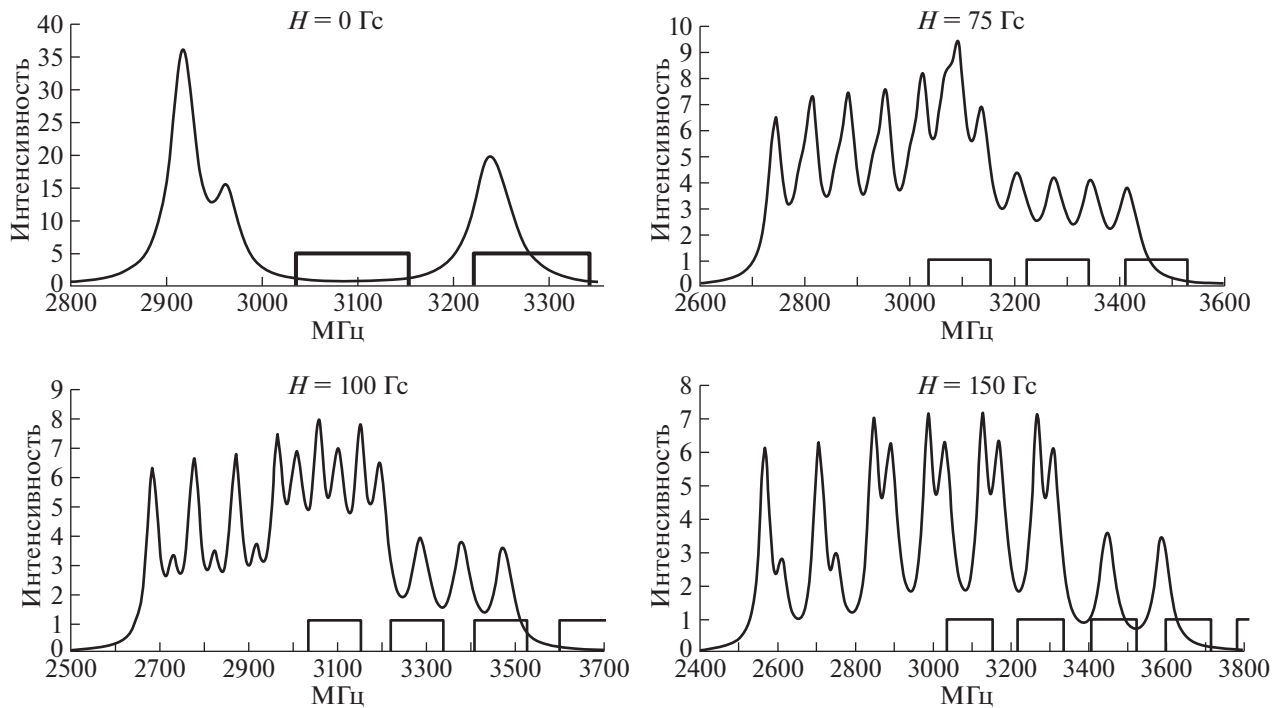


Рис. 5. Профиль зеемановского расщепления линий $3^2P_{3/2}-3^2S_{1/2}$ и $3^2D_{3/2}-3^2P_{1/2}$ для ряда поперечных магнитных полей. На осях рисунков показаны положения низкочастотных каналов спектрального комплекса радиотелескопа РАТАН-600.

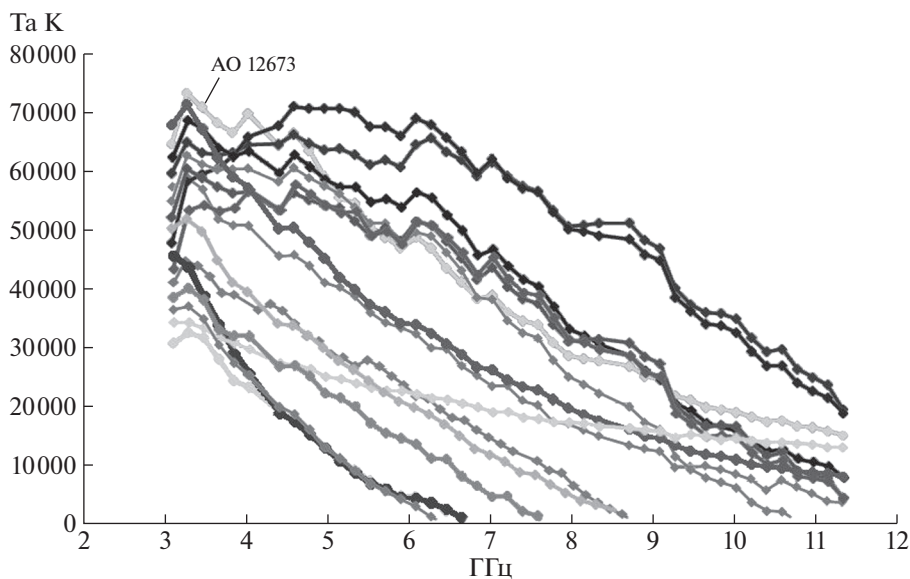


Рис. 6. Низкочастотные края спектров шестнадцати АО. Вертикальная шкала соответствует только самому интенсивному АО 12673.

чтобы показать вид завала спектра в самом низкочастотном канале спектрального комплекса (3094 МГц) в каждом из АО.

На рис. 7 показан спектр АО 12673, из спектра не исключен компонент, принадлежащий спокойному Солнцу. В спектре видны две особенно-

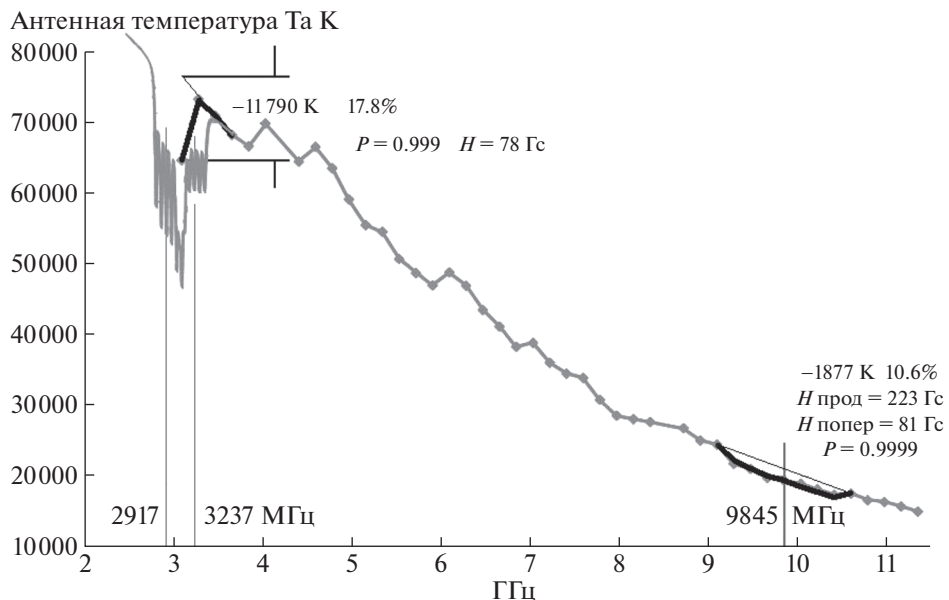


Рис. 7. Спектр АО 12673. Видны три радиолинии поглощения 9845, 2917 и 3237 МГц. Показаны их интенсивности относительно фона АО и вычисленные по ним магнитные поля. Для линий 2917 и 3237 МГц показан профиль, не сглаженный каналами спектрального комплекса.

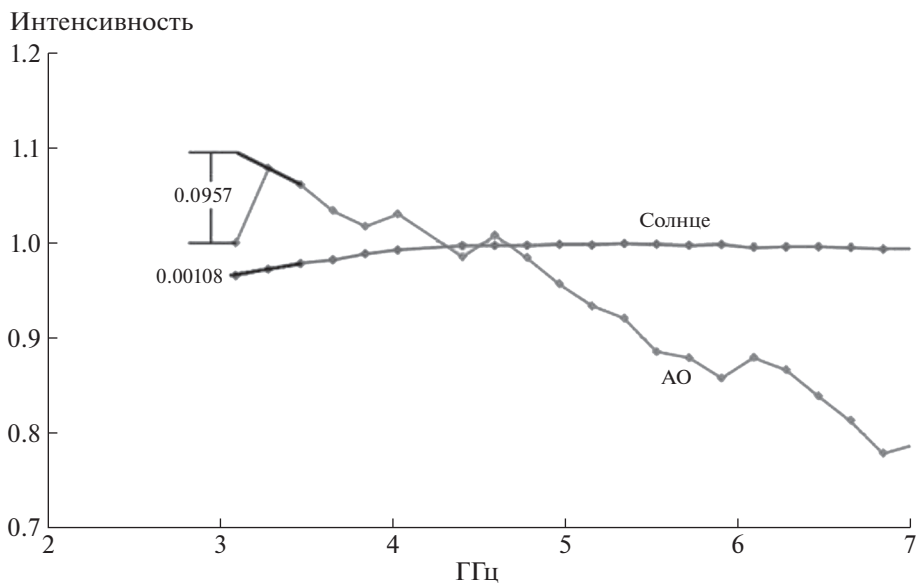


Рис. 8. Средние относительные спектры: из 16 спектров АО и 30 спектров спокойного Солнца. Завал спектра в низкочастотном канале спектрографа наблюдается в спектрах АО и практически не наблюдается в спектрах спокойного Солнца.

сти: одна — на частоте 9845 МГц, вторая — на частотах, близких к 3 ГГц. Первая особенность — уже известная радиолиния водорода 9845 МГц

(3.05 см), ($H_{3,05}$) [1]. Вторая — завал спектра в самом низкочастотном канале спектрографа, — как будет показано, представляет собой две водород-

Таблица 2. Спектральные параметры 16 солнечных активных образований: интенсивности радиолоний 2917 и 3237 МГц, и 9845 МГц, и соответствующие им магнитные поля (МП)

№ АО	Наблюдалось			Для линий ≈ 3 ГГц			Для линии 9845 МГц			
	Дата	Коорд	T_a , max	T_a , лин	%	МП	T_a , лин	%	МП $_{\parallel}$	МП $_{\perp}$
	Д. М. Г.	Сек	К	К	лин	Гс	К	лин	Гс	Гс
12565	15.07.16	-470	20247	-1051	7.1	85	-769	15.8	219	73
12565	16.07.16	-250	19435	-1818	14.8	75	-757	9.3	221	73
12565	17.07.16	-45	33487	-3895	14.4	83	-1579	16.2	219	66
12565	20.07.16	+580	23593	-2423	13.0	75	-692	9.8	212	58
12565	18.07.16	+200	21920	-1683	7.4	85	-635	6.6	217	62
12565	19.07.16	+400	25475	-2192	7.8	80	-1192	15.4	214	60
12567	20.07.16	+475	43591	-6474	18.3	75	-1458	8.1	236	92
12574	13.08.16	-135	21903	-2069	13.2	78	-224	7.8	209	55
12644	28.03.17	-20	19657	-1659	12.8	75	-415	11.0	0	208
12673	05.09.17	+410	73314	-1790	17.8	78	-1877	10.6	223	81
12699	09.02.18	-400	19707	-2500	17.7	70	-120	6.3	208	99
12706	22.04.18	-500	12972	-340	4.3	80	-95	6.3	217	54
12768	06.08.20	+340	8271	-228	10.3	70	нет	0	-	-
12769	06.08.20	-225	7792	-226	14.6	75	-54	9.2	222	95
12770	06.08.20	-685	8811	-397	10.1	75	нет	0	-	-
12770	08.08.20	-350	10212	-553	14.7	75	-60	6.5	89	0

ные радиолонии 2917 и 3237 МГц (10.28 см) и (9.27 см), ($H_{10,28}$) и ($H_{9,27}$), расщепленные магнитным полем. Все три линии видны в поглощении.

Завал спектра хорошо аппроксимируется (жирная ломаная линия) с помощью этих низкочастотных линий поглощения при поперечном магнитном поле 78 Гс, сглаженных каналами спектрального комплекса. Вероятность совпадения наблюденного спектра АО и аппроксимирующей кривой, вычисленная по статистике Пирсона (хи квадрат), составляет $P = 0.999$. Здесь также отображены профили низкочастотных линий, не сглаженные каналами спектрального комплекса. Процентное содержание линий вычислено относительно фона АО.

В табл. 2 представлены параметры 16 обработанных АО. Все АО наблюдались в азимуте 0. Параметр T_a , max представляет максимальное значение антенной температуры в АО. Из него не исключена доля T_a , принадлежащая спокойному Солнцу. T_a , лин – глубина линии поглощения. Процентное содержание линий дано относительно фона, из которого исключен фон спокойного

Солнца. Во всех 16 АО наблюдаемые завалы спектров в низкочастотном канале спектрографа хорошо аппроксимируются этими низкочастотными линиями поглощения при магнитном поле в диапазоне 70–85 Гс. Линия поглощения 9845 МГц обнаружена только в 14 АО. По этой линии измерялись как продольные, так и поперечные составляющие магнитного поля. Их суммы лежат в диапазоне от 90 до 250 Гс.

Для проверки того, не являются ли завалы спектров АО в низкочастотных каналах спектрографа, принимаемые за проявления линий, аппаратными артефактами, проведено сравнение 16 спектров АО и 30 спектров спокойных участков Солнца. Из 30 спокойных участков 16 взяты из тех же сканов, в которых получены спектры 16 АО. На рис. 8 показаны средние относительные спектры из 16 АО и 30 спокойных участков Солнца.

Отношение уровней завала спектра в самом низкочастотном канале спектрографа (0.0957/0.00108) составляет 89. Это означает, что никакого аппаратного артефакта нет и что водородные радио-

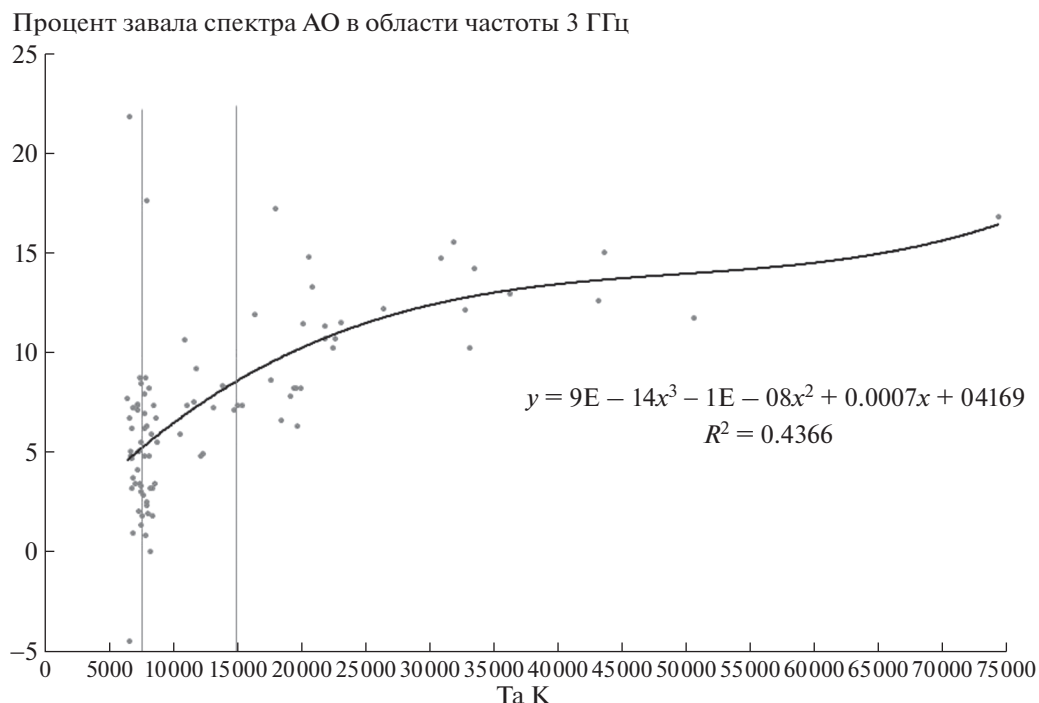


Рис. 9. Зависимость процента завала спектра АО в области частоты 3 ГГц от T_a .

линии $3^2P_{3/2}-3^2S_{1/2}$ и $3^2D_{3/2}-3^2P_{1/2}$ наблюдаются в АО и не наблюдаются на участках спокойного Солнца.

Чтобы составить представление о том, насколько распространенным является завал спектра в АО на частотах ~ 3 ГГц, были трижды просканированы все данные наблюдений двух центров: радиоастрономического (РАТАН-600) и оптического (Нобейма, NOAA). Наблюдательные данные NOAA используются для отождествления АО, наблюдаемых на РАТАНе, с номерами групп солнечных пятен, наблюдаемых NOAA.

На рис. 9 показана зависимость завала спектра в АО на частотах ~ 3 ГГц от антенной температуры T_a наблюдаемого сигнала Солнца. Сигнал Солнца включает в себя как сигнал от спокойного Солнца, так и сигнал от АО. Использовано всего 90 измерений, из них 25 предельно слабых сигналов, представляющих полную выборку всех наблюдавшихся АО при T_a от 6000 до 7569 К, и 30 предельно сильных сигналов, также представляющих полную выборку от 73314 до 15086 К. Кроме того, использовано 35 случайно выбранных сигналов средней интенсивности. Две вертикальные линии на рисунке разграничивают эти три участка. Процент завала спектра вычислялся как отношение T_a завала к разности T_a Солнца — 6000 К.

Всего за время от начала работы спектрального комплекса радиотелескопа РАТАН-600 (21.05.2016)

и до 28.12.2020 на Солнце появилось 239 АО от № 12547 до № 12786. По объективным причинам (непогода, ремонт аппаратуры, профилактика) наблюдения на РАТАНе и в обсерватории Нобейма проводились не каждый день. Поэтому реально наблюдавшихся АО было заметно меньше 239. Завал спектра на 3 ГГц наблюдается практически во всех АО, за ничтожным исключением (2 из 90).

Приведем аргументы, подтверждающие реальность наблюдаемых радиолиний.

1) Можно подозревать, что наблюдаемый эффект является артефактом по причине различий в величине сигналов спокойного солнца и АО. Проверим это. Динамический диапазон (ДД) сигналов, принимаемых спектральным комплексом РАТАН-600 без искажений, составляет 100000 [13]. Собственные шумы комплекса составляют 300 К, тогда ДД в градусах К составляет 3×10^7 К. Из 16 обработанных АО максимальная антенная температура 73000 К наблюдалась в АО 12673, что составляет 0.24% от ДД. Таким образом, подозрение не оправдывается.

2) Наличие случайных независимых явлений, указывающих на присутствие радиолиний:

а) теоретическая возможность наличия линий в соответствующем месте спектра [2],

б) наличие подходящего завала спектра,

в) измеренный эффект Зеемана по этим линиям приводит к магнитным полям 70–85 Гс, в то

же время магнитные поля, измеренные по линии 9845 МГц, составляют 200–250 Гс, что соответствует общеизвестным фактам убывания поля с высотой над фотосферой.

4. ДИСКУССИЯ

Наблюдения [1] показали, что в АО линия $2^2P_{3/2}-2^2S_{1/2}$ иногда составляет 10% от фона АО и более. Из табл. 1 следует, что линия $3^2P_{3/2}-3^2S_{1/2}$ должна быть в 6.4 раза слабее уже наблюдавшейся в [1] линии $2^2P_{3/2}-2^2S_{1/2}$. Основываясь на этих данных наблюдений, можно ожидать, что в АО линия $3^2P_{3/2}-3^2S_{1/2}$ будет иметь интенсивность 1.5%, а линия $3^2D_{3/2}-3^2P_{1/2} \approx 1\%$ от фона АО. Настоящая работа показывает, что интенсивность этих линий в АО превосходит ожидающуюся величину на порядок. Таким образом, водородные радиолинии $3^2P_{3/2}-3^2S_{1/2}$ (2917 МГц) (10.28 см) и $3^2D_{3/2}-3^2P_{1/2}$ (3237 МГц) (9.27 см) могут быть перспективным инструментом изучения верхних слоев атмосферы Солнца.

Обратим внимание на ряд любопытных фактов.

Из обработанных 16 АО следует, что в активных образованиях все три водородные радиолинии $H_{3.05}$, $H_{9.27}$ и $H_{10.28}$ всегда наблюдаются в поглощении. Это означает, что над АО расположен относительно холодный водород. Схема образования холодного атомарного водорода в хромосфере над солнечными пятнами была предложена по результатам наблюдений на инфракрасном спектрополяриметре [14]. Известно, что в солнечной атмосфере положение слоя, эффективно излучающего радиоволны, над фотосферой зависит от длины волны [15]. Чем длиннее волна, тем выше излучающий слой. Из табл. 1 видно, что вероятности спонтанных переходов у более длинноволновых линий $3^2P_{3/2}-3^2S_{1/2}$ и $3^2D_{3/2}-3^2P_{1/2}$ значительно снижаются относительно таковой у коротковолновой линии $2^2P_{3/2}-2^2S_{1/2}$. Однако интенсивность длинноволновых линий, как показывает настоящая работа, не уменьшается. Это может означать, что плотность атомов холодного водорода над областью АО возрастает с ростом высоты над фотосферой. Следовательно, в АО может наблюдаться серия однотипных, более длинноволновых радиолиний для главных квантовых чисел $n = 3, 4, \dots$

К сожалению, полноценно исследовать солнечные радиолинии на РАТАН-600 невозможно. Все аргументы указывают на необходимость иметь такие солнечные спектральные комплексы: один — с разрешением ~ 30 МГц в полосе 8–12 ГГц, второй — с разрешением ~ 10 МГц в полосе 2–4 ГГц. В этом случае, при работе радиотелескопа РАТАН-600 в пассажном режиме, ошибки измерений увеличатся соответственно \sim в 1.7 и 3 ра-

за и станут ~ 0.35 и $\sim 0.6\%$ от фона, что не является достаточным. Необходимо проводить спектральные исследования Солнца с помощью радиолиний на полноповоротных антеннах с указанными комплексами. Выигрыш по чувствительности будет получен за счет сопровождения источника наблюдения. Например, при сопровождении длительностью 1^m на таких комплексах с последовательным анализом спектра, ошибки измерения составят ~ 0.05 и 0.1% .

5. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ спектральных наблюдений Солнца на радиотелескопе РАТАН-600 показал следующее.

1. В спектре излучения активных образований над пятнами (АО) впервые обнаружены признаки двух радиолиний тонкой структуры атома водорода $3^2P_{3/2}-3^2S_{1/2}$ и $3^2D_{3/2}-3^2P_{1/2}$ с максимумами на частотах, соответственно, 2917 и 3237 МГц (10.28 и 9.27 см). Глубина этих линий достигает более 10% от фона АО. Практически во всех АО эти линии наблюдаются одновременно с линией $2^2P_{3/2}-2^2S_{1/2}$ (9845 МГц, 3.05 см), и все они наблюдаются в поглощении.

2. Рассмотрено зеемановское расщепление радиолиний (10.28 и 9.27 см), и по ним определены характерные магнитные поля в АО (70–85 Гс).

3. Вероятно, над АО имеют место уплотнения более холодного атомарного водорода и это позволяет надеяться, что над АО будет наблюдаться серия более длинноволновых радиолиний, соответствующих главным квантовым числам $n = 3, 4, \dots$

4. Показано, что в спектре излучения спокойных участков Солнца низкочастотные линии $H_{9.27}$ и $H_{10.28}$ не наблюдаются.

БЛАГОДАРНОСТИ

Благодарим Н.Г. Петерову и Н.А. Топчило за помощь, а также В.К. Дубровича за интерес к работе.

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. *С. Э. Фриш, Оптические спектры атомов* (М.: Физматгиз, 1963).
10. *В. Б. Берестецкий, Е. М. Лифшиц, Л. П. Питаевский Квантовая электродинамика, т. 4* (М.: “Наука”, 1989).
11. *И. В. Савельев Курс общей физики, т. 3* (М.: “Наука”, 1987).
12. *E. U. Condon and G. H. Shortley The Theory of Atomic Spectra* (Cambridge University Press, 1935).
13. *В. М. Богод, А. М. Алесин, А. А. Перваков, Астрофиз. бюлл.* **66**, 2 (2011).
14. *S. A. Jaeggli, H. Lin, and H. Uitenbroek, Astrophys. J.* **745**, 133 (2012).
15. *В. В. Железняков Радиоионизлучение Солнца и планет* (М.: “Наука”, 1964).