

УДК 523.98

ПРОФИЛЬ ЛИНИИ НЕЙТРАЛЬНОГО ВОДОРОДА НА ЧАСТОТЕ 9.85 ГГц С УЧЕТОМ ЭФФЕКТА ЗЕЕМАНА (РАСЧЕТ И НАБЛЮДЕНИЯ СОЛНЦА)

© 2019 г. А. Ф. Дравских¹, Н. Г. Петерова^{1*}, Н. А. Топчило^{2**}¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Санкт-Петербургский филиал,
Санкт-Петербург, Россия²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 04.07.2018 г.; принята в печать 13.09.2018 г.

В сложном спектре излучения Солнца линия атомарного водорода на частоте 9.85 ГГц (3.04 см), связанная с переходом $2^2P_{3/2}-2^2S_{1/2}$ между уровнями сверхтонкой структуры нейтрального водорода, занимает особое место. Это практически единственная линия водорода, которую можно ожидать в излучении Солнца в радиодиапазоне. Впервые на перспективность наблюдений Солнца в линии $H_{3.04}$ было указано в 1952 г. Уайлдом, которым был рассчитан профиль линии, выполненный в рамках модели “спокойного” Солнца, характеризующегося слабым магнитным полем (несколько Гс). Мы предлагаем расчеты профиля линии с учетом сильных магнитных полей в активных областях Солнца (сотни Гс) и показываем, что эффект Зеемана приводит к значительным изменениям вида профиля линии. Возможно, вследствие этого результаты поиска линии $H_{3.04}$ не позволяли до сих пор заявить об ее обнаружении. Приведены новые результаты наблюдений Солнца на радиотелескопе РАТАН-600 и их анализ с учетом эффекта Зеемана.

DOI: 10.1134/S0004629919030022

1. ВВЕДЕНИЕ

Единственная линия водорода, которую можно ожидать в излучении Солнца в радиодиапазоне, — линия на частоте 9.85 ГГц (3.04 см), связанная с переходом $2^2P_{3/2}-2^2S_{1/2}$ между уровнями сверхтонкой структуры термов 2P и 2S атома нейтрального водорода. Расчеты, впервые выполненные в 1952 г. Уайлдом [1] и позднее дополненные Зеленкой [2], показали, что в рамках модели “спокойного” Солнца большой интенсивности излучения (поглощения) в линии $H_{3.04}$ ожидать не приходится, если населенность уровней определяется соударениями в условиях теплового равновесия. Однако в 1959 г. Де Ягером [3] было указано, что вероятность столкновений, возможно, должна значительно увеличиваться во время хромосферных вспышек на Солнце.

Наблюдения с целью поиска линии $H_{3.04}$ были начаты в 1958 г. А.Ф. Дравских [4] именно с наблюдений хромосферных вспышек с использованием специально разработанной методики наблюдений

и их обработки в узком диапазоне частот (9.35–10.35) ГГц. Оказалось, что в 17% случаев особенности спектра можно было интерпретировать как обусловленные излучением в линии $H_{3.04}$. В дальнейшем более подробно исследовалось и квазиспокойное Солнце (вне вспышек) [5–7]. Согласно итоговой работе [7], в которой суммированы результаты обработки 188 спектрограмм по наблюдениям с низким пространственным разрешением (30'), оценка интенсивности линии $H_{3.04}$ составляет в максимуме $(1.55 \pm 0.02)\%$ от уровня континуума. Там же приведен профиль линии, который по мнению авторов предварительно следует считать достаточно хорошо совпадающим с предсказанным в работе [1], однако указано, что полученные результаты нуждаются в подтверждении на основе наблюдений с высоким угловым разрешением. По мере увеличения частотного разрешения приемной аппаратуры радиотелескопа РАТАН-600 оказалось возможным искать линию $H_{3.04}$ с помощью этого инструмента, используя штатную методику наблюдений [8] и высокое пространственное разрешение ($\sim 28''$ на волне 3 см). Так, при исследовании структуры и динамики источников радиоизлучения над активными областями (АО) были замечены некоторые особенности в спектре АО NOAA

*E-mail: peterova@yandex.ru

**E-mail: topchilona@yandex.ru

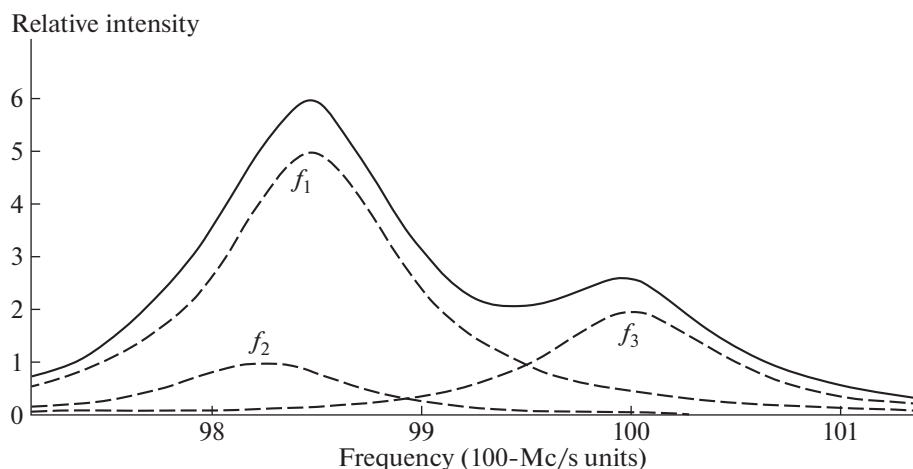


Рис. 1. Профиль линии $H_{3.04}$ для немагнитной плазмы согласно [1].

10105 вблизи частоты линии $H_{3.04}$ [9], интерпретированные как проявление излучения в этой линии и связанные с послевспышечными процессами. Сравнительно недавно были опубликованы результаты наблюдений АО NOAA 12436 (ноябрь 2015 г.) [10], демонстрирующие сложную тонкую структуру спектра в диапазоне линии $H_{3.04}$. Позже аналогичная особенность спектра была обнаружена при анализе наблюдений АО NOAA 12529 (апрель 2016 г.) [11]. Результаты этих наблюдений навели нас на мысль о необходимости учета эффекта Зеемана при поиске линии $H_{3.04}$, который не учитывался в расчетах [1, 2].

Здесь мы приводим результаты расчета эффекта Зеемана для линии $H_{3.04}$, а также результаты наблюдений микроволнового излучения Солнца и их сопоставление с расчетным профилем линии.

2. РАСЧЕТ ЭФФЕКТА ЗЕЕМАНА ДЛЯ ЛИНИИ $H_{3.04}$

Согласно [1] профиль линии $H_{3.04}$ для солнечной плазмы при магнитном поле $H = 0$ — это триплет с максимумами компонентов на частотах $f_1 = 9.847$ ГГц (наибольший), $f_2 = 9.823$ ГГц и $f_3 = 10.0$ ГГц. Огибающая этого триплета имеет вид двугорбой кривой с максимумом на частоте ~ 9.85 ГГц (см. рис. 1).

Расчет эффекта Зеемана выполнен с использованием известной теории переходов между уровнями сверхтонкой структуры термов $2P$ и $2S$ атома водорода с учетом спина ядра в полном механическом моменте [12]. Для определения расщепления радиолнии водорода $2^2P_{3/2} - 2^2S_{1/2}$ в магнитном поле для каждого из взаимодействующих уровней (термов P и S) достаточно знать пять квантовых чисел: n — главное, l — орбитальное,

m — магнитное, s — спин электрона и j — квантовое число, учитывающее спин-орбитальное взаимодействие электрона, т.е. учитывающее полный механический момент электрона. Из символического представления линии $2^2P_{3/2} - 2^2S_{1/2}$ следует, что для верхнего уровня $n = 2, l = 1, j = 3/2$ (символ P означает $l = 1$, а S означает $l = 0$), для нижнего — $n = 2, l = 0, j = 1/2$. Магнитное квантовое число m принимает ряд значений от $+j$ до $-j$ с шагом 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 каждой линии в триплете, но поскольку все квантовые числа без учета спина ядра у них одинаковы, то и расщепляться они будут одинаково, т.е. профиль расщепленных компонентов останется триплетом, идентичным профилю невозмущенной линии. Рассмотрение термов второго главного квантового уровня $n = 2$, расщепленных в магнитном поле в соответствии со значениями магнитных квантовых чисел m , и учет разрешенных переходов, формирующих расщепленные компоненты линии в соответствии с правилом отбора $\Delta m = 0, \pm 1$, показывает, что линия расщепляется на 6 компонентов симметрично относительно исходной частоты ν_0 , а на исходной частоте не остается ничего. Компоненты, получающиеся при $\Delta m = 0$, называются π компонентами, а остальные — σ компонентами. Здесь π компонентами являются два ближайших к ν_0 симметрично расположенных компонента. Они линейно поляризованы вдоль магнитного поля, остальные две крайние пары компонентов имеют круговую поляризацию разного знака. На рис. 2 приведены примеры расщепления триплета $2^2P_{3/2} - 2^2S_{1/2}$ в продольном и поперечном магнитных полях, π -компоненты в продольном поле отсутствуют, а σ -компоненты противо-

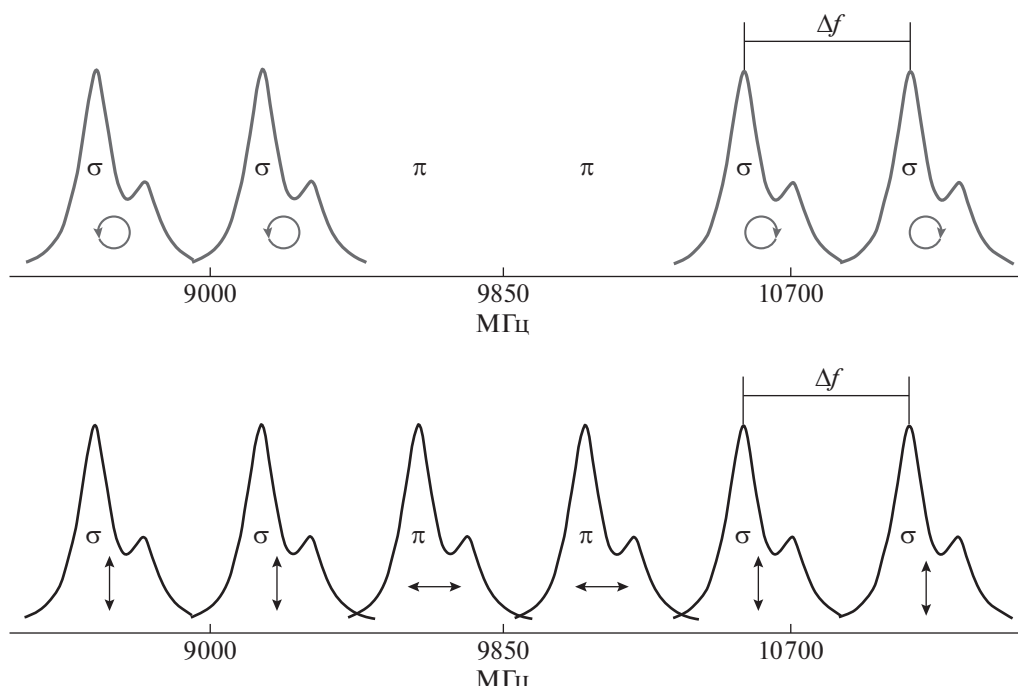


Рис. 2. Профиль линии $H_{3,04}$ с учетом эффекта Зеемана для замагниченной солнечной плазмы в магнитном поле $H \sim 520$ Гс.

положно поляризованы по кругу. В поперечном поле присутствуют все 6 компонентов, они линейно поляризованы, π -компоненты — вдоль поля, а σ -компоненты — перпендикулярно полю.

Для вычисления степени расщепления линии $\delta\nu$ относительно исходного положения ν_0 в зависимости от напряженности магнитного поля H , воспользуемся известными формулами $\delta\nu = \mu_b/h[g_2m_2 - g_1m_1]H$, где отношение магнетона Бора к постоянной Планка $\mu_b/h = 13.99624555 \times 10^5$ Гц/Гс ≈ 1.3996 МГц/Гс, а m_2 и m_1 — магнитные квантовые числа верхнего и нижнего уровней. Фактор Ланде для верхнего и нижнего уровней g_2 и g_1 вычисляется по формуле

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

где j , l , s — обсуждавшиеся выше квантовые числа, тогда получается

$$g_2 = 4/3, \quad g_1 = 6/3, \quad \delta\nu_1 = \pm 0.4665H, \\ \delta\nu_2 = \pm 1.3996H, \quad \delta\nu_3 = \pm 2.3327H.$$

Таким образом, вычисления дают равномерное, пропорциональное напряженности поля распределение расщепленных компонентов со смещением относительно центральной частоты ν_0 , равным $\delta\nu_k = \pm 0.4665 \times (2k-1) \times H$, где k — номер компонента, считая от ν_0 , $\delta\nu_k$ — в Мегагерцах, H — в гауссах. Расстояние между соседними компонентами $\delta\nu = 0.933H$. Расщепление, изображенное на рис. 2, соответствует полям ~ 520 Гс.

Значения частот компонентов $f_k = \nu_0 + \delta\nu_k$ и $\Delta f = \delta\nu$ линейно увеличиваются с увеличением магнитного поля (МП). При этом в продольном МП остаются видными только 4 компонента ($k = 2, 3$), которые имеют противоположно направленную круговую поляризацию. В поперечном поле видны все 6 компонентов, которые имеют линейную поляризацию, указанную на рис. 2. Очевидно, что с учетом эффекта Зеемана на центральной частоте 9.85 ГГц излучение может отсутствовать. Кроме того, выявляется важное дополнительное свойство, связанное с характером поляризации излучения, выражающееся в симметрии разнополяризованных компонентов профиля на шкале частот относительно расчетного значения 9.85 ГГц.

3. МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ СОЛНЦА И ИХ ОБРАБОТКИ

Для сопоставления расчетов с наблюдениями использованы регулярные спектральные наблюдения Солнца, ведущиеся на радиотелескопе РАТАН-600 [8] с высоким пространственным и частотным разрешением (на волне 3 см $\sim 28''$ и 2% соответственно), выставляемые в свободном доступе по адресу <http://www.spbf.sao.ru/prognoz/>. Обработка наблюдений проводилась на основе штатной методики [10], которая позволяет изучать различные характеристики источников излучения. Для поиска линии $H_{3,04}$ нами использовался параметр T_a (антенная температура), требующий

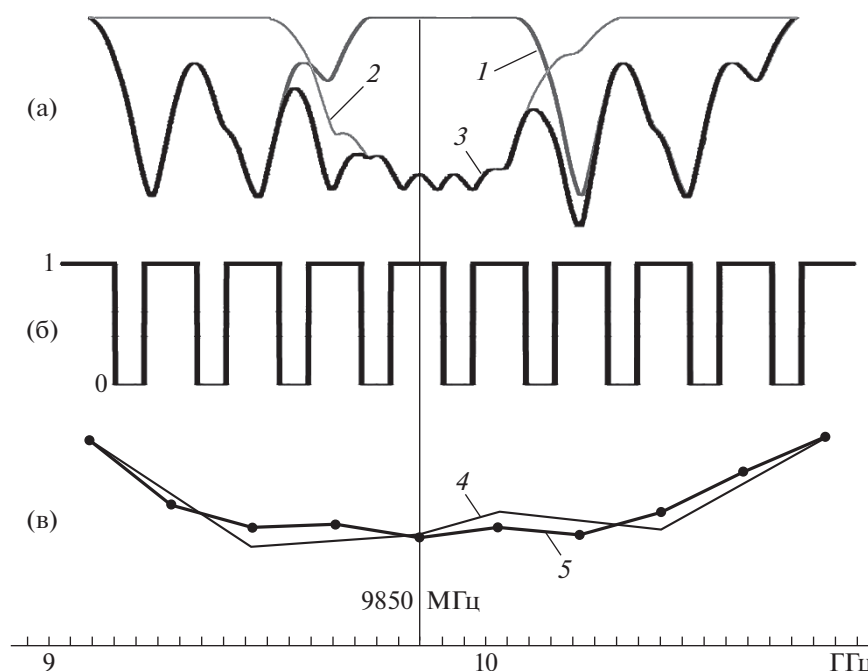


Рис. 3. Информация, отображаемая на дисплее компьютера, в процессе подбора модели профиля линии $H_{3.04}$, аппроксимирующей наблюдаемый спектр.

минимальной обработки и потому не искаженный дополнительными ошибками, возникающими при обработке таких параметров, как T_v и F (яркостная температура и спектральная плотность потока излучения соответственно). Значение параметра T_a вычислялось при задании минимально возможных размеров области излучения по долготе $\sim 40''$, близких к величине горизонтальной диаграммы РАТАН-600 на волне 3 см ($28''$). При этом по другой координате в диаграмму попадает почти весь диск Солнца, при наведении на его центр РАТАН-600 “видит” узкую полосу с размерами $\sim (40'' \times 1370'')$. Изучаемый нами РАТАН-скан Солнца — это одномерное распределение T_a по его диску.

Особого описания требует разработанная нами методика сопоставления спектра T_a с расчетным профилем линии $H_{3.04}$ с учетом эффекта Зеемана. Создана компьютерная программа, которая позволяет в полуавтоматическом режиме моделировать спектр наблюдаемого объекта, учитывая эффект Зеемана и таким образом определять напряженность и ориентацию корональных МП. Программа использует форму невозмущенного профиля линии (см. рис. 1), закономерности Зеемановского расщепления этой линии и прямоугольную форму полосы пропускания приемных каналов спектрографа, введенных в программу как постоянные параметры. Кроме того, в процессе вычислений оператор вводит спектр наблюдаемого объекта и

такие параметры, как напряженности продольного, вдоль луча зрения, ($H_{||}$) и поперечного ($H_{\perp}$) МП и амплитуды продольной и поперечной компонент линии (I). Качество подбираемой модели оценивается по величине вероятности по критерию Пирсона (χ^2), определяющей достоверность совпадения модели и спектра. Подбор модели прекращается, когда параметр критерия χ^2 , вычисляемый программой, достигает минимума. Вводимые в программу параметры (магнитные поля и амплитуды компонент линии) в начале подбора модели определяются визуально по виду спектра объекта в области частот около 9.85 ГГц, а конечные их значения определяются по достижению минимума параметра критерия Пирсона. Приемные каналы спектрографа равномерно распределены по частоте через 187.5 МГц, прямоугольная полоса пропускания канала, принятая в программе, имеет ширину 120 МГц. При таких параметрах спектрографа аппаратная ошибка определения напряженности МП составляет порядка 10 Гс. На рис. 3 показан вид дисплея компьютера в процессе подбора модели линии, аппроксимирующей наблюдаемый спектр: а) модельный профиль в продольном (1) и поперечном (2) поле соответственно и их сумма (3), б) идеализированная частотная характеристика спектрографа, в) наблюдаемый спектр (4) и его аппроксимация (5) для АО 12644 (28.03.2017).

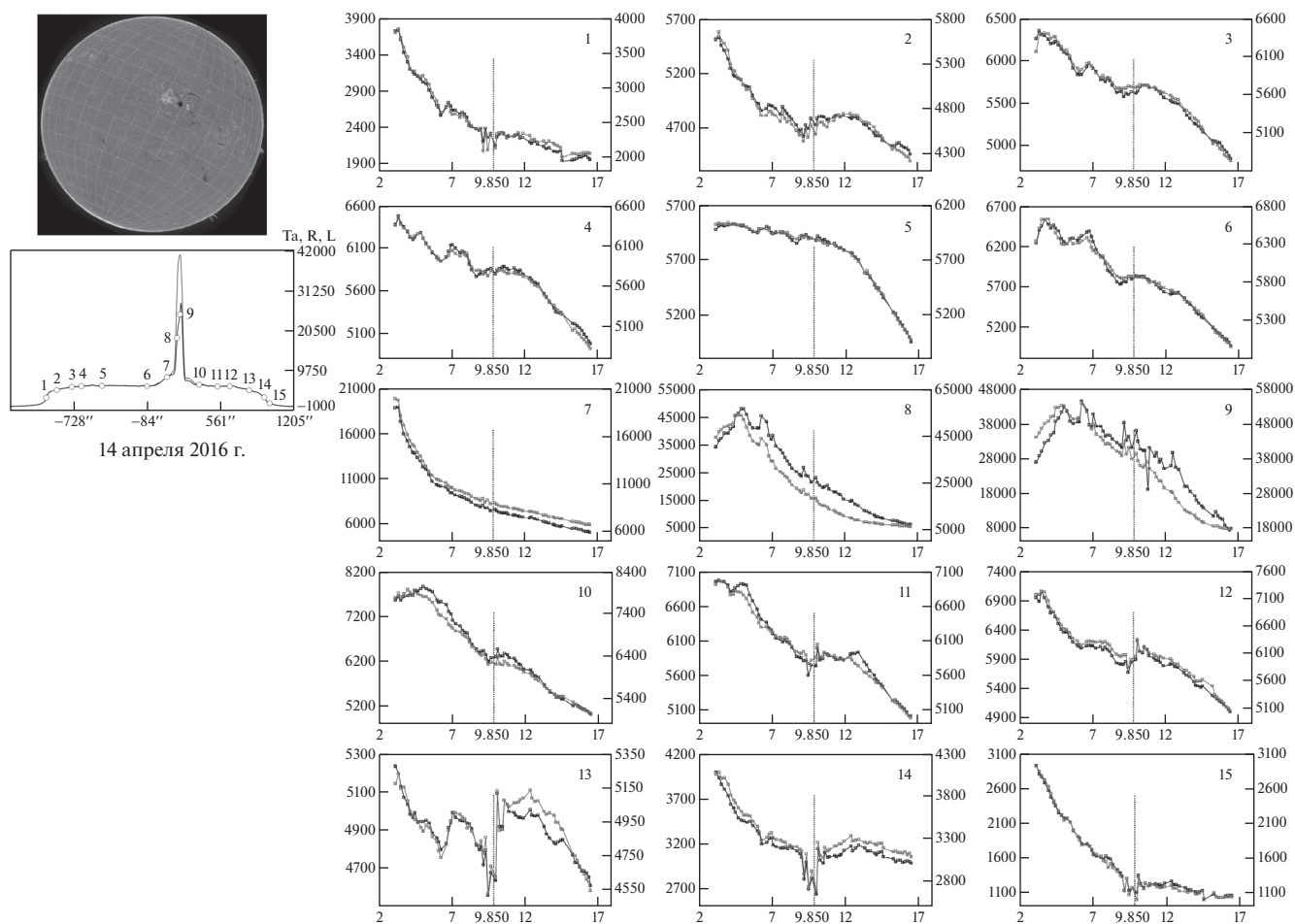


Рис. 4. Иллюстрация метода поиска линии нейтрального водорода на частоте 9.850 ГГц при наблюдениях Солнца 14.04.2016 г. на радиотелескопе РАТАН-600. Спектры даны в единицах антенной температуры T_a для правой и левой круговых поляризаций (R, L), значения по оси абсцисс приведены в ГГц.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ И СОПОСТАВЛЕНИЯ С ЗЕЕМАНОВСКИМ ПРОФИЛЕМ ЛИНИИ $H_{3,04}$

Высокое одномерное пространственное разрешение радиотелескопа РАТАН-600 на волне 3 см позволяет получить изображение Солнца в виде скана и при обработке каждого скана измерить спектры антенной температуры для различных точек на скане (максимально до 60 независимых спектров T_a). С увеличением области интегрирования вдоль скана число независимых измерений уменьшается, но одновременно уменьшается и шумовая составляющая в спектре. На рис. 4 представлен пример таких измерений и приведена последовательность спектров при анализе РАТАН-скана диска Солнца в 14 точках, в каждой из которых анализируется вертикальная полоска диска с размерами вдоль скана $\sim 300''$. В эту полоску могут попадать и суммироваться участки диска с различной природой излучения, такие как спокойное

Солнце, флоккульные уярчения, активные области и протуберанцы. На рисунках видно, что фоновое излучение различно для разных точек наблюдения, но в пределах одного спектра оно меняется достаточно монотонно и изменения тонкой структуры спектра отмечаются только около частоты 9.85 ГГц, т.е. линии $H_{3,04}$. Наибольший эффект присутствия линии $H_{3,04}$, причем переменный, в данном случае наблюдается в западном полушарии Солнца.

Применяя описанную выше методику, мы проанализировали наблюдения Солнца, выполнявшиеся на РАТАН-600 в период сентябрь 2016 г. — декабрь 2017 г. Рассмотрено около 600 площадок спокойного Солнца и 80 активных областей. На рис. 5 приведены некоторые результаты наблюдений (спектры), а также результаты сопоставления наблюдений с расчетным Зеемановским профилем линии $H_{3,04}$. Для АО спектры даны после вычитания фонового излучения. Кривые на рис. 5 таковы: 1 — наблюдаемый спектр объекта в районе

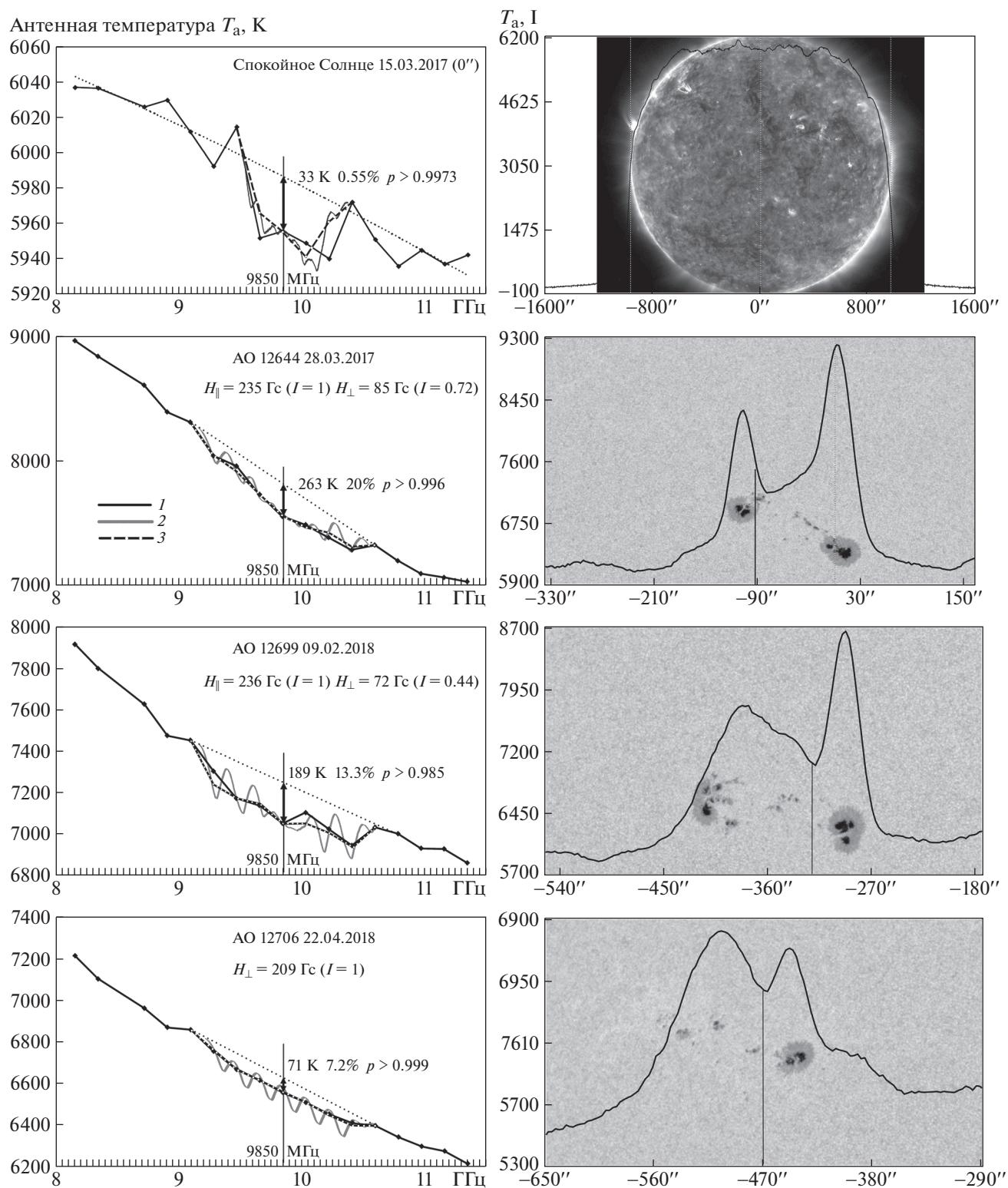


Рис. 5. Примеры наблюдаемых спектров в районе линии $H_{3.04}$ и ее расчетная аппроксимация с учетом эффекта Зеемана для активных областей и спокойного Солнца.

линии $H_{3.04}$; 2 — расчетный спектр линии, аппроксимирующий наблюдаемые детали, 3 — расчетный спектр, усредненный по ширине приемных каналов

спектрографа. Справа от каждого спектра приведены данные, полученные на SDO: для спокойного Солнца — изображение всего диска в линии $171 \text{ \AA}$,

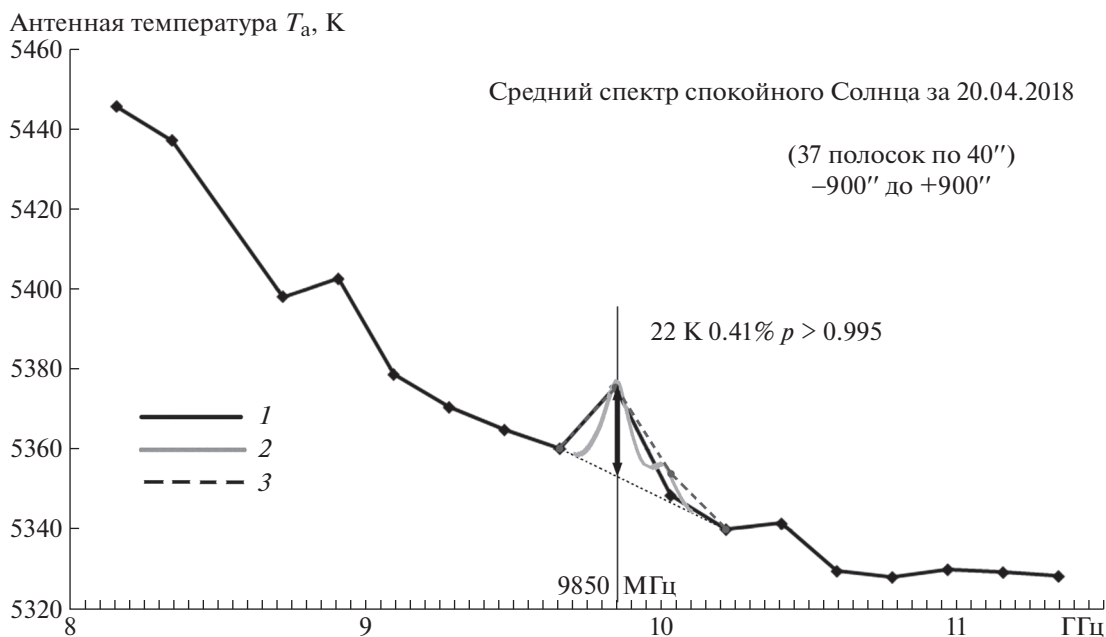


Рис. 6. Пример узкой линии $H_{3.04}$, наблюдавшейся в спектре спокойного Солнца в излучении. Обозначения кривых те же, что и на рис. 5.

для активных областей — фотогелиограмма, совмещенные с РАТАН-сканом на волне 3.0475 см (канал с центральной частотой 9.844 ГГц, ширина канала 120 МГц). Обозначено положение диаграммы направленности радиотелескопа на момент измерения спектра.

5. ДИСКУССИЯ

При анализе результатов наблюдений в качестве основной задачи ставился поиск линии $H_{3.04}$ с предсказанным Уайлдом [1] профилем ($H = 0$). Естественно, что такие случаи наиболее вероятны при наведении на участки спокойного Солнца, которые выбирались как минимумы на РАТАН-сканах Солнца. Пробная обработка большого числа сканов (до 600 случаев) показывает, что такая узкая линия в слабом МП излучается очень часто и практически повсеместно на всем диске Солнца. Можно сделать выводы, что она наблюдается (1) как в излучении, так и в поглощении, (2) ее интенсивность иногда достигает 2.5% от уровня фона, (3) размеры областей, ее излучающих, вероятно не превосходят 50'', (4) время жизни образований, излучающих линию, вероятно, не превосходит 8 мин, (5) в излучении линия наблюдается практически одинаково часто как в центре, так и на краях диска Солнца, а в поглощении — преимущественно на краях, в связи с чем ранее [6] при наблюдении Солнца в линии $H_{3.04}$ отмечался эффект потемнения к краю. В целом оказалось, что линия $H_{3.04}$ наблюдается с достаточно малой

интенсивностью $\sim 0.5\%$ по отношению к уровню спокойного Солнца на этой частоте (T_a линии \ T_a спокойного Солнца). На рис. 5 (вверху) показан один из наиболее наглядных примеров узкой, слабо расширенной спектральной линии, наблюдавшейся в поглощении. Он получен, возможно, благодаря удачному расположению в день наблюдений вертикальной диаграммы направленности РАТАН-600 относительно более ярких источников излучения, окружавших участок спокойного Солнца. На рис. 6 приведен пример наблюдения линии на спокойном Солнце, не уширенной за счет МП ($H = 0$), наблюдавшейся в излучении.

В активных областях глубина линии $H_{3.04}$ на порядок больше (до 10–15%), как это было замечено еще в [9]. Профиль линии носит сложный характер, и в пределах одной АО соседствуют участки с избытком в линии $H_{3.04}$ как излучения, так и поглощения. Полученный наблюдательный материал (80 случаев) требует тщательной классификации и более тонкого анализа, что выходит за рамки данного исследования. Здесь мы приводим спектры для трех активных областей (NOAA 12644, 12699, 12706), имевших однотипную морфологию групп пятен (класс D), примерно одинаковую площадь пятен $S_p \sim (100–200)$ м.д.п. и простую структуру МП (биполярные). Причем представленные на рис. 5 спектры относятся к межпятенному пространству между головной и хвостовой частями АО. Для их аппроксимации рассматривалось совместное действие продольных и поперечных МП.

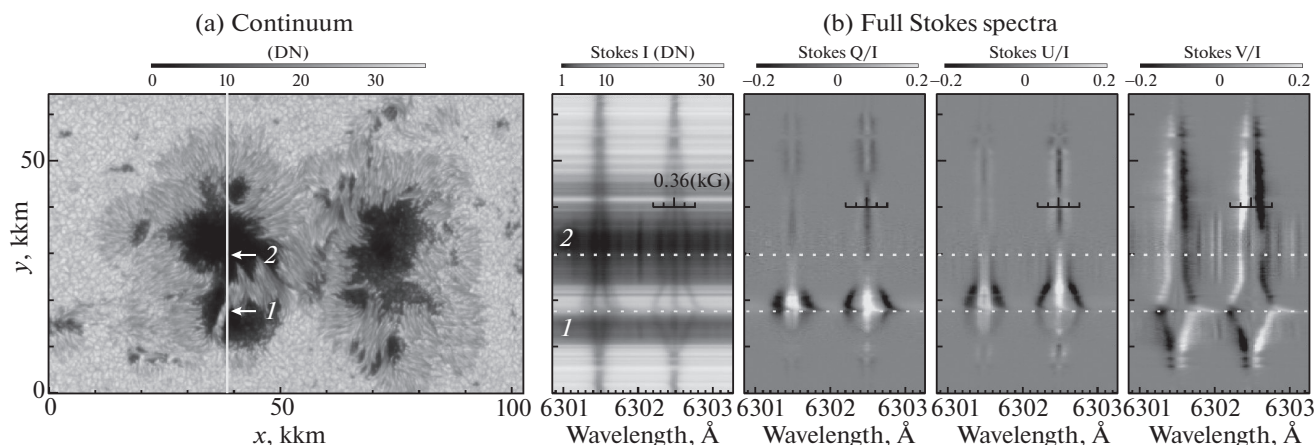


Рис. 7. Пример разнообразия тонкой структуры Зеемановского расщепления линий в пределах одного пятна по наблюдениям в оптическом диапазоне [13].

Наилучшее согласие наблюдений этих АО с модельными расчетами достигается при напряженности МП $\sim (200-250)$ Гс, что не противоречит представлениям о величине МП во флоккулярных уярчениях на уровне нижней хромосферы.

Большую трудность в интерпретации представляют эффекты, наблюдаемые прямо над тенью солнечных пятен. Еще в [9] было замечено, что на частоте линии $H_{3.04}$ наблюдалась не депрессия излучения, а увеличение спектральной плотности потока, т.е. возрастание температуры плазмы T_e . Спектр, наблюдаемый над тенью пятна, на примере исследованных нами случаев, а именно АО NOAA 12529, можно видеть на кадре 8 из рис. 4. Эта АО была уникальной: по наблюдениям на радиотелескопе NoRH ($\lambda = 1.76$ см) яркостная температура излучения в пятне в течение 10 суток держалась на рекордно высоком уровне $T_b \sim 2$ МК. При такой температуре трудно ожидать наличия в плазме нейтрального водорода, тем не менее спектр излучения на микроволнах по наблюдениям на РАТАН-600 демонстрирует тонкую структуру вблизи частоты 9850 МГц (2 или даже 3 детали в излучении). Однако нельзя исключить мешающее влияние соседних с пятном структур, попадающих в широкую вертикальную диаграмму телескопа.

Как отмечено выше, наибольший эффект присутствия линии $H_{3.04}$ в излучении Солнца 14.04.2016 (см. рис. 4) наблюдался для западного полушария. Кроме аномально яркого пятна в АО NOAA 12529, к западу от него регистрировались темные волокна, флоккулярные уярчения, УФ-петли, занимающие большую площадь обоих (N и S) полушарий. В целом именно с этими объектами ассоциируется усиление эффекта присутствия линии $H_{3.04}$ (кадры 10–13), причем наблюдаемой как в излучении, так и в поглощении. Однако одномерность диаграммы РАТАН-600 не позволяет

произвести более точное координатное отождествление отдельных деталей спектра и сопоставление с магнитограммой и изображением Солнца в других диапазонах излучения (УФ, рентген).

Насколько сложна структура МП активного Солнца в отдельных деталях, можно видеть в оптических наблюдениях, угловое разрешение которых значительно выше, чем в радиодиапазоне. На рис. 7 показан эффект Зеемана по наблюдениям на “Hinode” в линиях Fe I крупной АО NOAA 11967 (февраль 2014 г.) [13]. Видно, как сильно меняется МП (даже его знак) только в пределах тени одного из пятен (ядра 1 и 2). Можно представить, как должны замыкаться эти различия при наблюдениях с худшим угловым разрешением. Вот почему, возможно, значение интенсивности излучения в линии $H_{3.04}$, полученное нами по наблюдениям на РАТАН-600, значительно занижено. Вряд ли можно рассчитывать, что в ближайшее время на микроволнах появятся возможности, соответствующие оптическим, и будет измерено Зеемановское расщепление с точной привязкой к излучающему объекту. Пока все же можно искать случаи попадания в диаграмму РАТАН-600 областей, характеризующихся более-менее однородным полем, и вероятность таких событий не мала благодаря регулярности ведущихся на нем наблюдений Солнца с высоким угловым разрешением (2% на частоте линии $H_{3.04}$), включая архив с 2006 г.

Основное значение выполненных нами расчетов профиля линии $H_{3.04}$ с учетом эффекта Зеемана, кроме несомненного вклада в развитие фундаментальной физики солнечной плазмы, состоит в том, что на их основе можно сформулировать задачи дальнейших экспериментальных исследований линии $H_{3.04}$ в излучении Солнца и сделать следующий шаг в их развитии. Помимо этого, удалось понять

ранее полученные результаты наблюдений, в частности, почему они сильно различались от случая к случаю.

В настоящее время радиотелескоп РАТАН-600 является единственным в мире инструментом, с помощью которого можно исследовать линию $H_{3.04}$ с достаточно высоким частотным и угловым разрешением. Сопоставление расчетного профиля линии $H_{3.04}$ с наблюдениями показало, что возможности РАТАН-600 еще не исчерпаны до конца, прежде всего для наблюдений в линии $H_{3.04}$ нестационарных, недостаточно исследованных объектов и процессов на Солнце, таких как корональные дыры, протуберанцы, выбросы корональной массы, предвсплесковая депрессия яркости АО [14]. Что касается спокойного Солнца, то приходится признать, что в отсутствие вспышек плазма действительно находится в термодинамическом равновесии, как это и полагал Уайлд [1], и интенсивность наблюдаемой линии невелика.

6. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

С целью изучения магнитных полей на Солнце по наблюдениям в микроволновом диапазоне волн выполнено исследование его излучения в линии нейтрального водорода на частоте 9850 МГц и получены следующие результаты:

1. Впервые произведен расчет профиля линии нейтрального водорода $H_{3.04}$ с учетом эффекта Зеемана, и показано, что профиль линии расщепляется на отдельные компоненты, расстояние (Δf , МГц) между которыми прямо пропорционально величине магнитного поля (H , Гс) согласно формуле $\Delta f = 0.933 \times H$.

2. Проведены сопоставления расчетного профиля линии $H_{3.04}$ с наблюдениями на радиотелескопе РАТАН-600 участков **квазиспокойного Солнца** (600 случаев) и **80 активных областей**, показавшие, что контрастность линии для АО на порядок **больше (10–15% против 0.5%)**.

3. Показано, что наблюдения в линии $H_{3.04}$ открывают возможности очень **точных измерений**

напряженности корональных магнитных полей на Солнце (несколько Гс), однако для реализации этих возможностей требуется увеличить спектральное разрешение до ~ 30 МГц при полосе анализа ~ 4 ГГц и использовать наблюдения с высоким **двумерным** угловым разрешением.

Благодарим Л.А. Вайнштейна и А.Ф. Холтыгина, которые взяли на себя труд проверить правильность наших расчетов профиля линии с учетом эффекта Зеемана, сердечно признательны **М.А. Лившицу** за интерес к нашим работам. Работа частично поддержана грантом РФФИ 16-02-0749.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. P. Wild, *Astrophys. J.* **115**, 206 (1952).
2. A. Zelenka, *Solar Phys.* **58**, 17 (1978).
3. C. De Jager, in: *Paris Symposium on Radio Astronomy*, eds. R. N. Bracewell (Stanford Univ. Press., 1959), p. 96.
4. А. Ф. Дравских, *Известия ГАО* **164**, 128 (1960).
5. А. Ф. Дравских, *Известия ГАО* **172**, 40 (1964).
6. А. Ф. Дравских, З. В. Дравских, Препринт САО АН СССР. № 42Л. Л.: САО РАН, 1987.
7. А. Ф. Дравских, З. В. Дравских, *Астрон. журн.* **65**, 199 (1988).
8. В. М. Богод, А. М. Алесин, А. А. Перваков, *Астроф. бюлл.* **66**, 223 (2011).
9. Н. А. Топчило, Н. Г. Петерова, Т. П. Борисевич, *Астрон. журн.* **87**, 75 (2010).
10. V. M. Bogod and L. V. Yasnov, *Solar Phys.* **291**, 3317 (2016).
11. 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).
12. С. Э. Фриш. *Оптические спектры атомов* (М.: Физматгиз, 1963).
13. T. J. Okamoto and T. Sakurai, *Astrophys. J. Lett.* **852**, L16 (2018).
14. Б. П. Филиппов, О. Е. Ден, *Астрон. журн.* **95**, 379 (2018).