

Методы и результаты поиска линии нейтрального водорода на частоте 9.85 ГГц в излучении Солнца

© А. Ф. Дравских¹, Н. Г. Петерова¹, Н. А. Топчило²

¹СПбФ САО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

²СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия

Работа содержит историю и обзор результатов поиска излучения Солнца в линии нейтрального водорода на частоте 9.85 ГГц ($H_{3.04}$), предсказанной Уайлдом в 1952 г. Прослежены основные этапы начатых в 1959 г. исследований в области теории (механизма) этого излучения, методов наблюдений линии и их анализа.

Представлены результаты последних лет, связанные с разработкой нового метода измерения напряженности магнитного поля, который основан на учете влияния эффекта Зеемана на профиль линии. В условиях активных областей на Солнце значение поля может достигать ~ сотен и более Гс. Для апробации метода использованы штатные наблюдения на радиотелескопе РАТАН-600 с повышенным спектральным разрешением (120 МГц).

Сделан вывод, что для следующего шага в исследовании излучения Солнца в линии $H_{3.04}$ потребуются создание специализированного комплекса аппаратуры с полосой 8–11 ГГц и спектральным разрешением не менее 40 МГц. Для увеличения точности измерения магнитных полей желательны наблюдения с высоким двумерным угловым разрешением, на первом этапе — порядка размеров активной области — ~ 2–4 угл. мин.

Ключевые слова: радиоизлучение Солнца, нейтральный водород, радиолиния, магнитные поля, эффект Зеемана.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.48.15-28>

Введение

Единственная линия водорода, которую можно ожидать в радиоизлучении Солнца, — линия на частоте 9850 МГц (3.04 см), связанная с переходом $2^2P_{3/2} - 2^2S_{1/2}$ между уровнями сверхтонкой структуры атома нейтрального водорода. Расчеты, впервые выполненные в 1952 г. Уайлдом [1] и позднее дополненные Зеленкой [2], показали, что в рамках модели «спокойного» Солнца, когда населенность уровней определяется соударениями в условиях теплового равновесия, большой интенсивности излучения (поглощения) в линии $H_{3.04}$ ожидать не приходится. Однако в 1959 г. Де Ягером [3] было указано, что во время хромосферных вспышек на Солнце вероятность столкновений может значительно увеличиваться.

Наблюдения с целью поиска линии $H_{3.04}$ были начаты Дравских А. Ф. [4–5] с 1959 г. именно с наблюдений хромосферных вспышек, с использованием специально разработанной методики наблюдений и их обработки в уз-

ком 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) [6–7]. 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 ± 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.

С помощью приемной аппаратуры радиотелескопа РАТАН-600, частотное разрешение которого в процессе модернизации увеличивалось, появилась возможность искать линию $H_{3.04}$ при использовании штатной методики наблюдений [8] и его высокого пространственного разрешения ($\sim 28''$ на длине волны 3 см). Так, при исследовании структуры и динамики источников радиоизлучения над активными областями (АО) были замечены некоторые особенности спектра АО NOAA 10105 вблизи частоты линии $H_{3.04}$ [9], интерпретированные как проявление излучения в этой линии. В ноябре 2015 г. были опубликованы результаты наблюдений АО NOAA 12436 [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 авторов на мысль о необходимости учета эффекта Зеемана при поиске линии $H_{3.04}$, который не учитывался в расчетах [1, 2].

Расчет профиля линии $H_{3.04}$ с учетом эффекта Зеемана

В расчетах использована известная теория переходов в сверхтонкой структуре термов 2P и 2S атома водорода [12] и показано, что триплет $H_{3.04}$ (см. рис. 1а) в магнитном поле (МП) расщепляется на 6 компонент, профиль которых подобен профилю линии в отсутствие МП. Компоненты расположены симметрично относительно центральной частоты $f_0 = 9850$ МГц (см. рис. 1). Центральные частоты компонент $f_n = f_0 \pm 0.4665 \times (2n - 1) \times H$, где $n = 1, 2, 3$, H (Гс) — магнитное поле. Расстояние между соседними компонентами $\Delta f = 0.933 \times H$ измеряется в МГц. Значения f_n и Δf линейно увеличиваются с увеличением МП. При этом в продольном МП остаются видными только 4 компоненты ($n = 2, 3$), которые имеют противоположно направленную круговую поляризацию (см. рис. 1б). В поперечном поле видны все 6 компонент, которые имеют линейную поляризацию, указанную на рис. 1в.

Очевидно, что с учетом эффекта Зеемана на центральной частоте 9850 МГц [1] излучение может отсутствовать. Кроме того, выявляется важное дополнительное свойство — характер поляризации излучения — оно выражается в симметрии разнополярных компонент профиля на шкале частот относительно расчетного значения 9850 МГц.

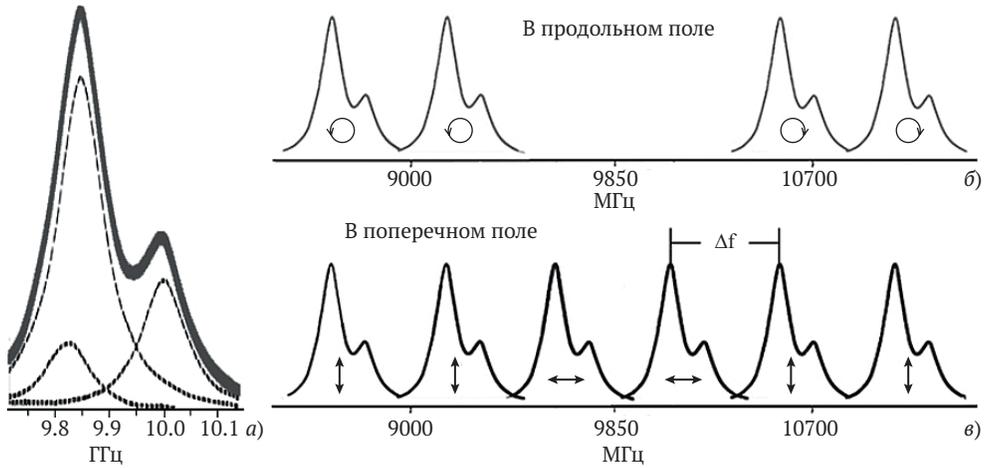


Рис. 1. а) — профиль линии нейтрального водорода $H_{3,04}$ в отсутствие магнитного поля [1]; б) профиль с учетом эффекта Зеемана в продольном; в) поперечном магнитных полях

Методика наблюдений и их анализа

Трудность поиска линии $H_{3,04}$ в излучении Солнца давно известна [13, с. 70–71] и состоит в том, что линия наблюдается на фоне более мощного тормозного излучения спокойного Солнца и циклотронного излучения источников над активными областями — оба механизма характеризуются нелинейным спектром, однако довольно гладким в широком диапазоне частот. С самого начала, когда спектральное разрешение было очень низким, для поиска линии применялся спектрограф [5], содержащий всего 3 частотных канала (рис. 2). Спектр сигнала представлялся степенной функцией вида $F_f = F_0 f^{-n}$, и вводилось понятие остаточной интенсивности r (это отношение интенсивности на данной частоте (f_2) к интерполированной к этой частоте интенсивности непрерывного спектра $F_{f_{13}}$, $r_{f_2} = F_{f_2} / F_{f_{13}}$). Значение показателя степени n , определяющего наклон спектра, позволяет оценить условия и механизм генерации всплеска радиоизлучения Солнца, а по r_{f_2} проверить, наблюдается ли предсказанная в [1] водородная линия. Канал f_2 был настроен на частоту ожидаемой линии, а крайние частоты f_1 и f_3 равноудалены от f_2 . На рис. 2б представлена средневзвешенная по 102 всплескам распространенность наклона спектра всплеска n_b . Видно, что наклон спектра в процессе развития всплеска сильно меняется. Наиболее характерное значение $n_b \approx -0.8$, сохраняется более 20 % времени от продолжительности всплеска.

В настоящее время появилась возможность проводить наблюдения с гораздо более высоким частотным разрешением, в частности, на радиотелескопе РАТАН-600. Регулярные спектральные наблюдения Солнца на этом инструменте [8] с высоким пространственным и частотным разрешением (на волне 3 см $\sim 28''$ и 2 % соответственно) ведутся с 2006 г. Они выставлены в свободном доступе на сайте <http://www.spbf.sao.ru/prognoz/>.

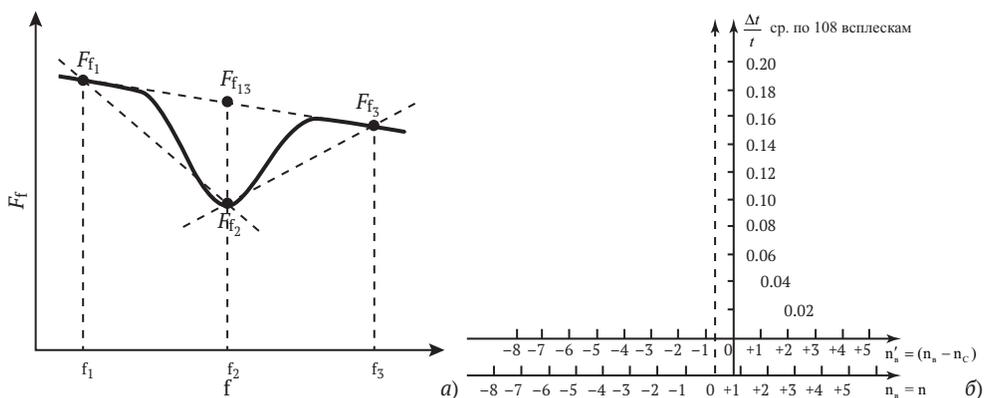


Рис. 2. К методике наблюдений на трехканальном спектрографе: а) — модель профиля линии $H_{3.04}$ (в поглощении); б) — $\Delta t/t$ ср. — средневзвешенная продолжительность наблюдения данного значения n'_b в течение всплеска; где n_c — наклон спектра спокойного Солнца, n'_b — изменение наклона спектра во время всплеска [5]

Обработка наблюдений, проводимая на основе штатной методики, позволяет изучать различные характеристики источников излучения. Для поиска слабых узкополосных деталей спектра, к которым в частности приходится отнести и линию $H_{3.04}$, следует применять методы, минимизирующие ошибки выделения фонового излучения. Оказалось, что для наблюдений на РАТАН-600 в этих целях лучше всего проводить анализ тонкой структуры спектра на стадии первичной обработки — в параметре Ta (антенная температура), не искаженной дополнительными ошибками, возникающими при обработке таких параметров, как Tv и F (яркостная температура и спектральная плотность потока излучения соответственно). Значение параметра Ta можно вычислить при задании минимально возможных размеров области излучения по длине $\sim 40''$, 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 авторами скан Солнца, получаемый на РАТАН-600, — это одномерное распределение Ta по его диску.

Особого описания требует разработанная авторами методика сопоставления спектра Ta с расчетным профилем линии $H_{3.04}$. 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 следующие параметры: напряженности продольного, вдоль луча зрения, и поперечного МП — $H_{||}$ и H_{\perp} соответственно — 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 достижении 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 аппаратурная ошибка определения напряженности МП составляет порядка 10 Гс. На рис. 3 показан вид дисплея компьютера в процессе подбора модели линии, аппроксимирующей наблюдаемый спектр на примере АО 12644 (28.03.2017).

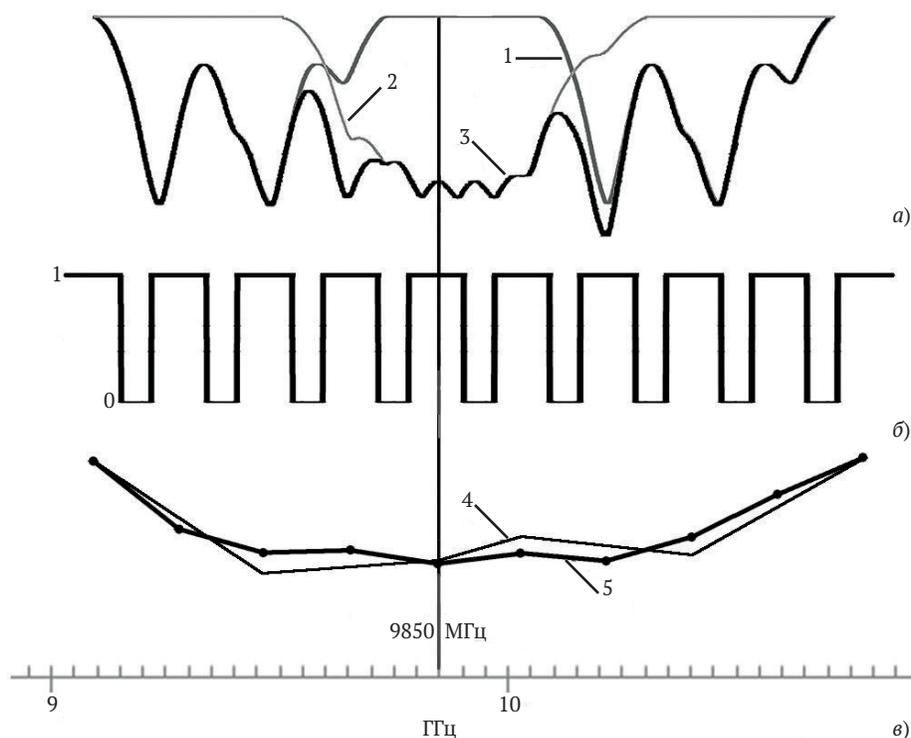


Рис. 3. Информация, отображаемая на дисплее компьютера:
 а) модельный профиль —
 в продольном (1) и поперечном (2) поле соответственно, и их сумма (3);
 б) идеализированная частотная характеристика спектрографа;
 в) наблюдаемый спектр (4) и его аппроксимация (5), см. [5]

Результаты наблюдений

Самые ранние наблюдения [5], выполненные с очень низким угловым и частотным разрешением показали, что эффект присутствия линии во всплесках радиоизлучения Солнца, по-видимому, достаточно велик (до 10 % от интенсивности всплеска). На рис. 4 представлено наблюдение одного из таких всплесков: 1 — сумма всех трех каналов, 2 — разность между средней частотой и полусуммой двух крайних, 3 — разность между крайними частотами. α_{16}/α_{1C} — интенсивность всплеска по отношению к интенсивности Солнца. Пунктиром на кривой 2 изображен ожидаемый уровень сигнала во время всплеска, если его спектр не отличается от спектра квазиспокойного Солнца.

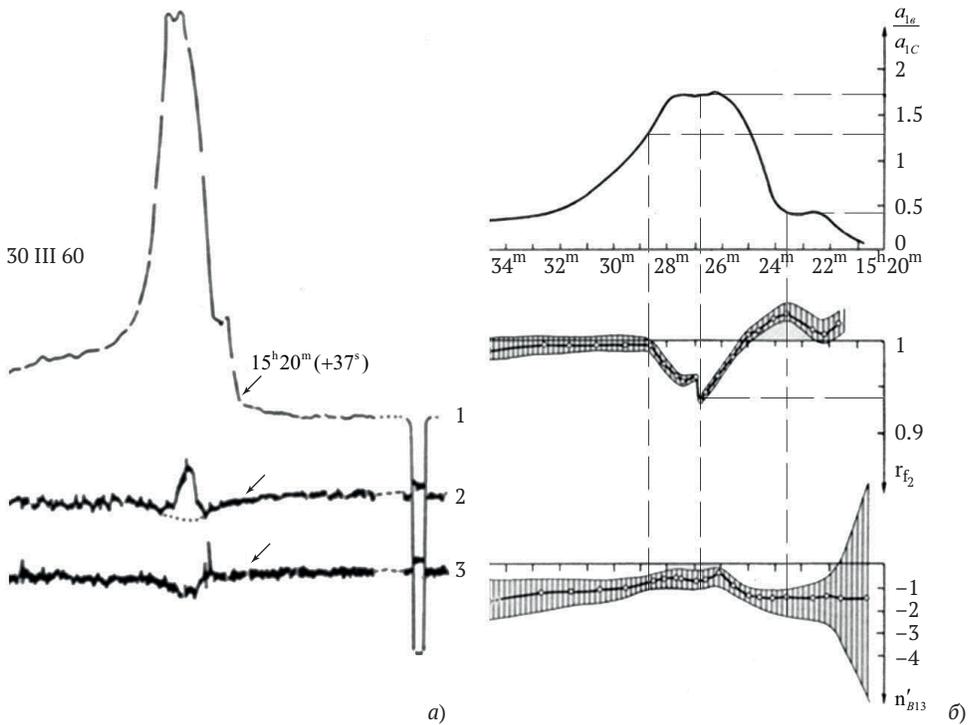


Рис. 4. Пример профиля всплеска *a)* и результатов обработки *б)* по наблюдениям на малом радиотелескопе с диаметром зеркала 3 м [5]

Видно, что наклон спектра, n'_{B13} , мало отличается от такого для Солнца и практически неизменен. А остаточная интенсивность показывает существенные изменения, указывающие на присутствие линии в начале и в максимуме всплеска, и полное ее отсутствие на спаде интенсивности всплеска. На трехканальном спектрографе было зарегистрировано 83 всплеска, из них в 14 всплесках наблюдалась остаточная интенсивность отличная от 1. Иногда она достигала величины 1.1 или 0.9. Статистика наблюдений всех 108 всплесков (см. рис. 4б) указывает на присутствие линии $2^2S_{1/2} - 2^2P_{3/2}$ в спектре ~17 % всплесков радиоизлучения Солнца.

Однако получить доказательства присутствия линии в излучении квазиспокойного (без всплеска) Солнца не удалось [5]. И только в дальнейшем [7], был воспроизведен даже профиль линии (см. рис. 5, взятый из [7]) при наблюдениях на двенадцатиканальном спектрографе в полосе 9350–10240 МГц и при низком угловом разрешении.

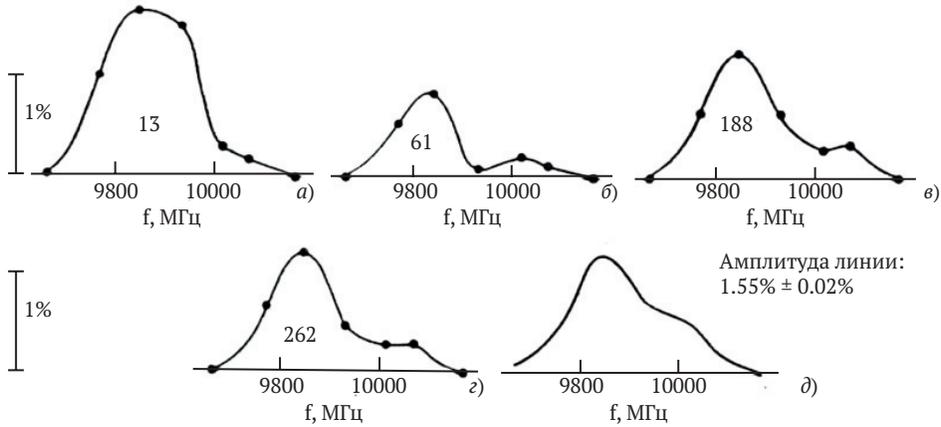


Рис. 5. Профиль линии $H_{3.04}$ в излучении квазиспокойного Солнца (вне всплеска) [7], полученный при наблюдениях с применением различных методов калибровки (а, б, в); указано число наблюдений, профиль г) — средневзвешенный из а, б, в; профиль д) — ожидаемый (инструментально-теоретический)

По мере увеличения частотного разрешения РАТАН-600 и благодаря регулярности наблюдений Солнца попался случай [9], показавший, что в единичном событии эффект присутствия линии может увеличиваться на порядок, достигая 30 % (рис. 6).

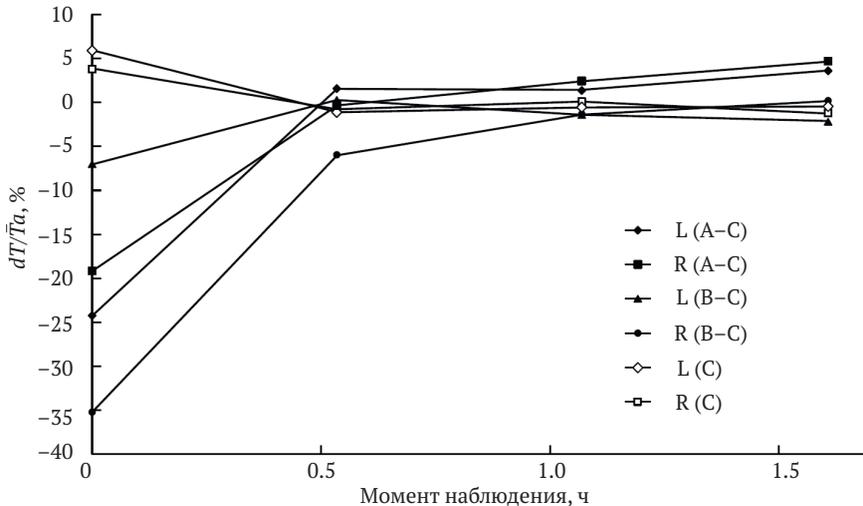
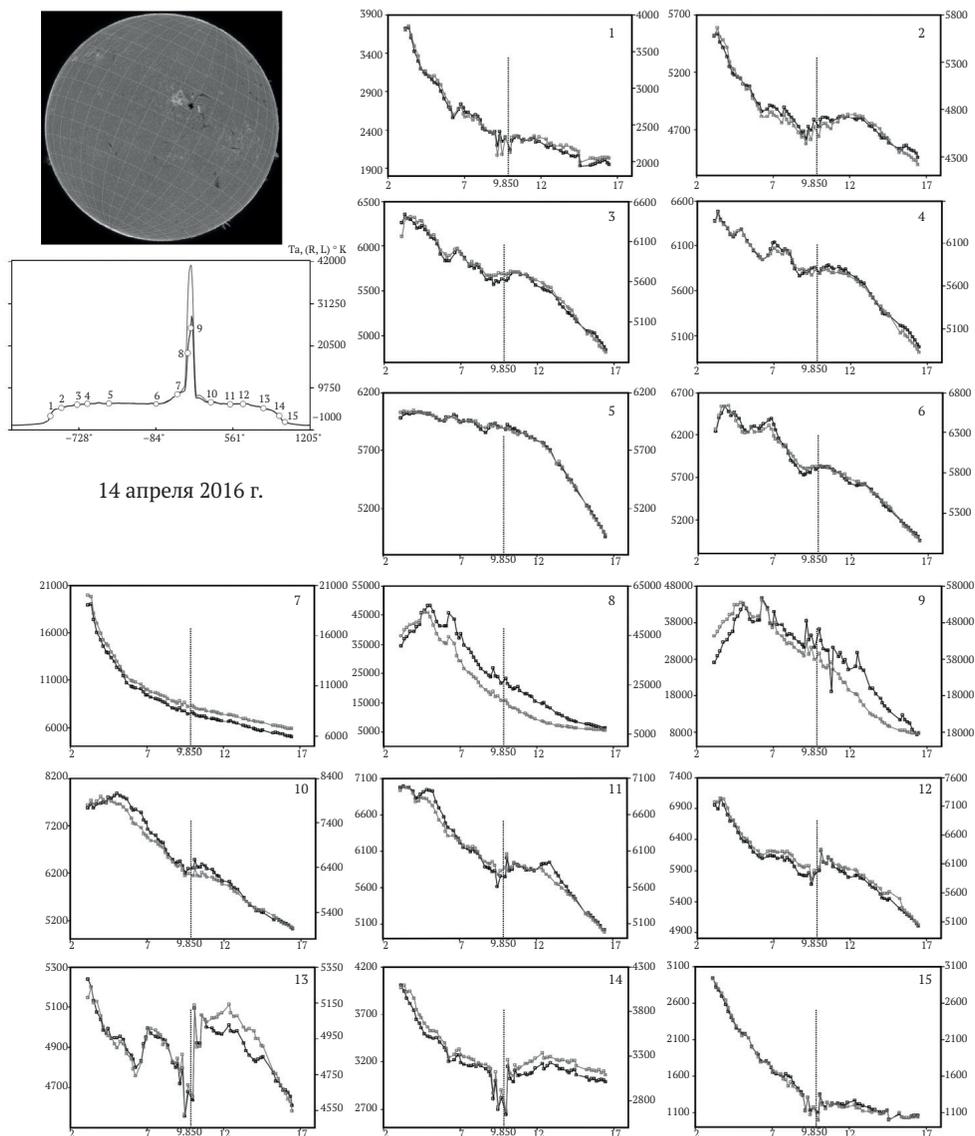


Рис. 6. Иллюстрация динамики глубины линии $H_{3.04}$ в излучении радиоисточника над АО NOAA 10105 по наблюдениям 11.09.2002 на радиотелескопе РАТАН-600 в четырех азимутах (с разницей во времени ~ 9 мин); данные приведены раздельно для двух деталей структуры источника — пятенной (А) и протяженной (В, называемой «гало»); фон (С) — спокойное Солнце вблизи от источника [9, рис. 2]



14 апреля 2016 г.

Рис. 7. Иллюстрация метода поиска линии нейтрального водорода на частоте 9850 ГГц при наблюдениях Солнца 14.04.2016 г. на радиотелескопе РАТАН-600. Спектры даны в параметре «антенная температура» T_a (°K) для правой и левой круговых поляризаций (R, L)

Спектрополяриметр РАТАН-600 для наблюдений Солнца непрерывно совершенствуется, увеличивая частотное и временное разрешение. При одномерности его ДН получается изображение Солнца в виде скана и при обработке каждого скана можно измерить спектры антенной температуры для различных точек на скане (на волне см 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. 7 представлен пример таких измерений и приве-

дена последовательность спектров при анализе РАТАН-скана диска Солнца в 15 точках, в каждой из которых анализируется вертикальная полоска диска с размерами вдоль скана $\sim 300''$. При этом в эту полоску могут попадать и суммироваться участки диска с различной природой излучения, такие как спокойное Солнце, флоккульные уярчения, активные области и протуберанцы.

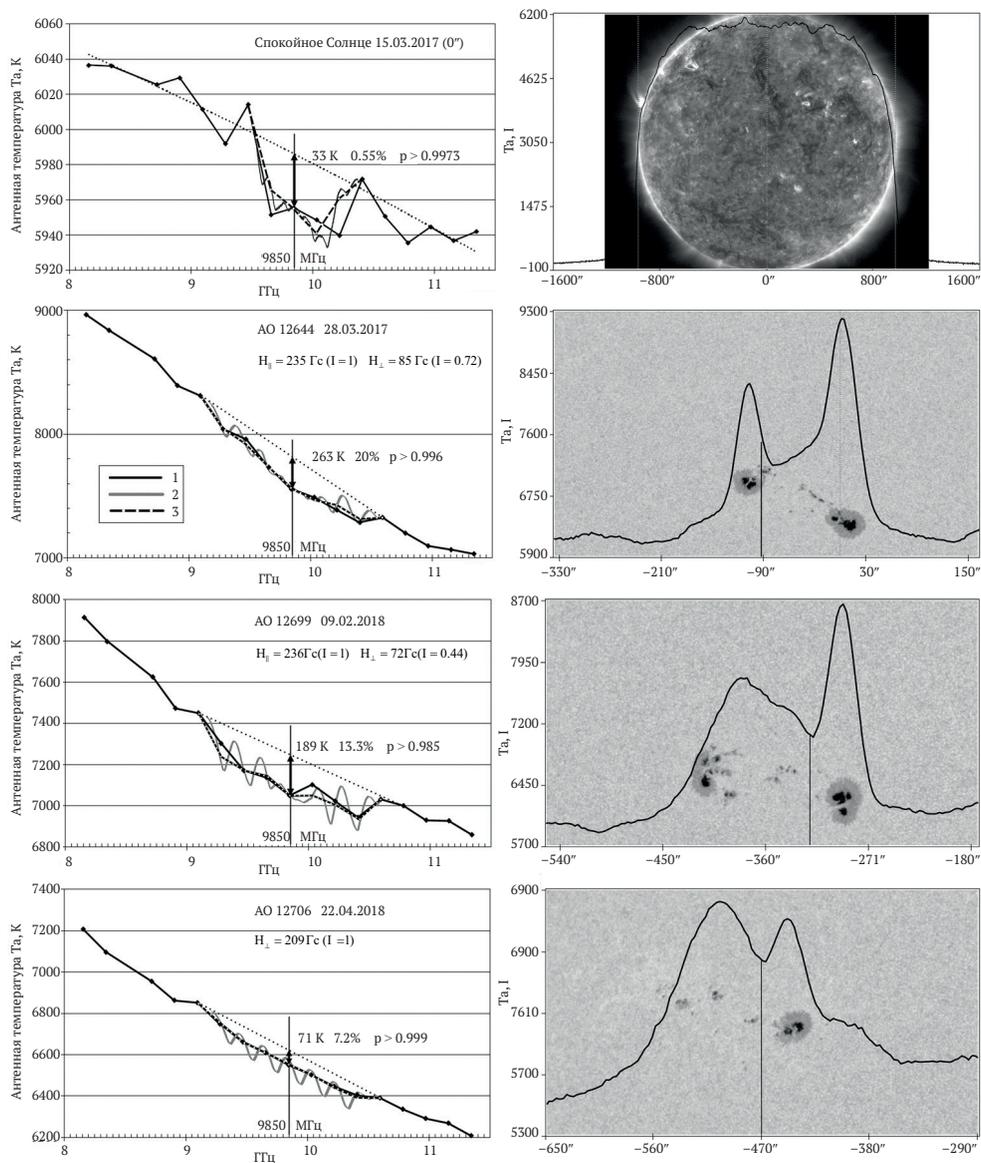


Рис. 8. Примеры наблюдаемых спектров в районе линии $H_{3.04}$ и ее расчетная аппроксимация с учетом эффекта Зеемана для активных областей и спокойного Солнца

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 W-полушарии Солнца.

По описанной выше методике были проанализированы наблюдения Солнца, выполненные на РАТАН-600 в период сентябрь 2016 г. – декабрь 2017 г. Рассмотрено около 600 площадок спокойного Солнца и 80 активных областей. На рис. 8 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. 8: 1 – наблюдаемый спектр объекта в районе 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 оптические данные: для спокойного Солнца (изображение всего диска в линии 171 Å, для активных областей – фотогелиограмма), совмещенные с РАТАН-сканом на волне 3.0475 см (канал с центральной частотой 9.844 ГГц, ширина канала – 120 МГц) и обозначено положение диаграммы направленности радиотелескопа в момент измерения спектра.

Более подробное описание полученных результатов опубликовано в [14].

Заключение

При расчете эффекта Зеемана мы полагали, что магнитное поле либо продольное, либо поперечное. Реально на Солнце вряд ли можно надеяться найти такой случай в чистом виде. Кроме того, оптические наблюдения, угловое разрешение которых значительно выше, чем в радиодиапазоне, показывают, как сильно может меняться МП (в том числе его знак) даже в пределах тени пятна. Можно представить, как должны замываться 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 однородным полем, и вероятность таких событий велика благодаря регулярности ведущихся на нем наблюдений Солнца с высоким угловым разрешением (2 % на частоте линии $H_{3.04}$), включая архив с 2006 г. Еще большие возможности безусловно предоставляют спектрально-поляризационные наблюдения с двумерным угловым разрешением, с помощью которых удастся действительно увидеть Зеемановское расщепление, как, например, для линии OH [15] (рис. 9).

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.

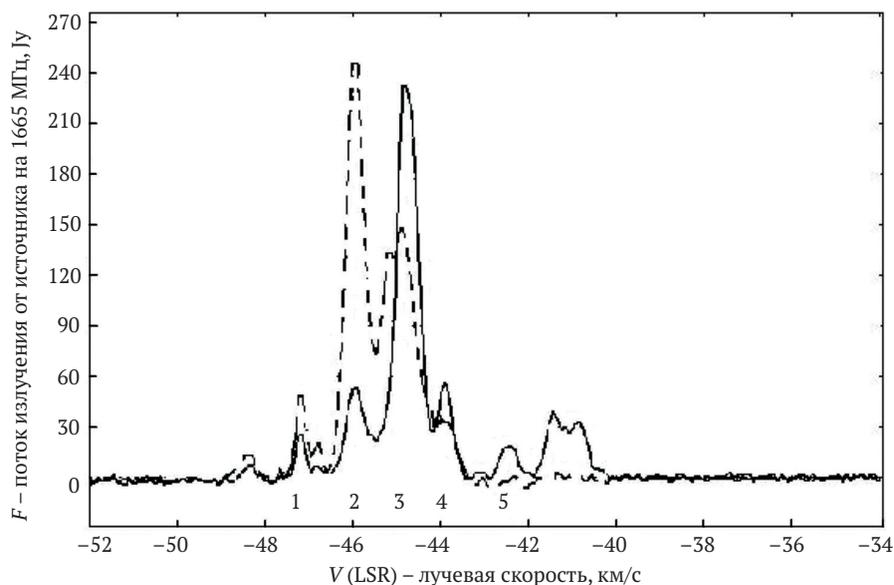


Рис. 9. Вспышка мазера в туманности W3 — профиль линии OH на частоте 1665 МГц по наблюдениям на радиотелескопе РТ-32 ИПА; сплошная линия — правая круговая поляризация, штриховая — левая

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.

Основные результаты

1. Впервые выполнен расчет профиля линии нейтрального водорода $H_{3,04}$ с учетом эффекта Зеемана и показано, что профиль линии расщепляется на отдельные компоненты, расстояние между которыми прямо пропорционально величине магнитного поля. Приведена соответствующая формула. Показано, что наблюдения в линии открывают возможности точных измерений корональных магнитных полей на Солнце.

2. Разработан новый метод анализа РАТАН-наблюдений Солнца с целью поиска узкополосных деталей в спектре его излучения, используя результа-

ты первичной обработки наблюдательных данных. Это облегчает и убыстряет процесс обработки, при сведении к минимуму ошибок измерений.

3. Проведены сопоставления расчетного профиля линии с наблюдениями для АО и других солнечных образований, и показано их хорошее согласие.

4. Для реализации новых возможностей, однако, требуется: увеличить спектральное разрешение до ~ 30 МГц при полосе анализа ~ 4 ГГц, и использовать наблюдения с высоким двумерным угловым разрешением, на первом этапе \sim размеров АО (2–4 угл. мин).

Благодарности

Благодарим Вайнштейна Л. А. и Холтыгина А. Ф., которые взяли на себя труд проверить правильность наших расчетов профиля линии с учетом эффекта Зеемана, сердечно признательны Лившицу М.А. за интерес к нашим работам.

Работа выполнена в рамках Государственного задания: САО РАН в части «Проведение фундаментальных научных исследований» и поддержана программой № 28 ПРАН.

Л и т е р а т у р а

1. Wild J. P. The Radio-Frequency Line Spectrum of Atomic Hydrogen and its Applications in Astronomy // *Astrophys. J.* — 1952. — Vol. 115, no. 2. — P. 206–221.

2. Zelenka A. The seven components of H alpha and the 9873 MHz line // *Solar Phys.* — 1978. — Vol. 58, no. 1. — P. 17–29.

3. De Jager C. The structure of the chromosphere and the low corona // Paris Symposium on Radio Astronomy, IAU Symposium no. 9 and URSI Symposium no. 1, 30 July–6 August, 1958 / ed. By Bracewell R. N. — Stanford Univ. Press., 1959. — P. 89–97.

4. Дравских А. Ф. Спектральные особенности развития всплесков радиоизлучения Солнца в см-диапазоне волн // *ИЗВ. ГАО.* — 1960. — № 164. — С. 128–139.

5. Дравских А. Ф. Статистические спектральные характеристики всплесков радиоизлучения Солнца в см-диапазоне волн и возможные механизмы излучения // *ИЗВ. ГАО.* — 1964. — № 172. — С. 40–78.

6. Дравских А. Ф., Дравских З. В. Подтверждение присутствия линии водорода $2^2P_{3/2}-2^2S_{1/2}$ (3.05 см) в радиоизлучении Солнца и распределение яркости линии по диску Солнца по наблюдениям на РАТАН-600 // *Препринт САО АН СССР.* — № 42Л.: САО АН СССР, 1987. — 15 с.

7. Дравских А. Ф., Дравских З. В. Предполагаемое обнаружение линии водорода $2^2P_{3/2}-2^2S_{1/2}$ в спектре радиоизлучения спокойного Солнца // *Астрон. журн.* — 1988. — Т. 65, Вып. 1. — С. 199–202.

8. Богод В. М., Алесин А. М., Перваков А. А. Радиотелескоп РАТАН-600 в 24 цикле солнечной активности. II Многооктавный спектрально-поляризационный комплекс высокого разрешения РАТАН-600 для солнечных исследований // *Астрофиз. бюлл.* — 2011. — Т. 66, № 2. — С. 223–233.

9. Топчило Н. А., Петерова Н. Г., Борисевич Т. П. Об излучении Солнца в линии водорода 3.04 см по наблюдениям активной области NOAA 10105 // *Астрон. журн.* — 2011. — Т. 88, № 9. — С. 912–919.

10. Bogod V. M., Yasnov L. V. Determination of the Structure of the Coronal Magnetic Field Using Microwave Polarization Measurements // *Solar Phys.* — 2016. — Vol. 291, no. 11. — P. 3317–3328.

11. *Alissandrakis C., Bogod V., Kaltman T., Peterova N.* Structure and polarization of large spots with RATAN-600 and the NoRH // CESRA 2016: Solar Radio Physics from the Chromosphere to Near Earth. WG 3: Fine structures and radio wave propagation. — 2016. — URL: https://cesra2016.sciencesconf.org/data/pages/CESRA2016_WG3_program_1.pdf.
12. *Фриш С. Э.* Оптические спектры атомов. — М., Л.: ГИФМЛ, 1963. — 640 с.
13. *Железняков В. В.* Радиоизлучение Солнца и планет. — М.: Наука, 1964. — 560 с.
14. *Дравских А. Ф., Петерова Н. Г., Топчило Н. А.* Профиль линии нейтрального водорода на частоте 9.85 ГГц с учетом эффекта Зеемана // Астрон. журн. — 2019. — Т. 96, № 3. — (В печати).
15. *Госачинский И. В., Гренков С. А., Ипатов А. В., Рахимов И. А.* Вспышка мазера OH в туманности W3 // Астрофиз. бюлл. — 2016. — Т. 71, № 3. — С. 358–371.

Methods and Results of the Search for a Neutral Hydrogen Line at the Frequency of 9.85 GHz in Solar Radiation

A. F. Dravskikh, N. G. Peterova, N. A. Topchilo

The only line of hydrogen that can be expected in the radio range of solar radiation is a line at the frequency of 9850 MHz (3.04 cm) associated with the $2^2P_{3/2} - 2^2S_{1/2}$ transition between the levels of the hyperfine structure of a neutral hydrogen atom. It was predicted in 1952 by Wild J.P., who showed that with local thermodynamic equilibrium, its intensity was not great. And in 1958, at the very beginning of the search for the line, De Yager stated that the line should be greatly enhanced during chromospheric flares.

These assumptions were fully confirmed by the full flux measurements of the Sun on small mirrors by A. Dravskikh. According to the 1959–1988 measurements, carried out with very low spectral (3-channel spectrograph) resolution, the line intensity in the quiet phase was ~ 1.55% relative to the continuum, and in the spectra of ~ 100 flares (1958–1962) some features were found that occupied ~ 20% of the event duration, which could be interpreted as due to radiation in the H3.04 line.

Later, this result was confirmed by the observations on the RATAN-600 radio telescope with higher angular (28") and spectral resolution (90 channels), which made it possible to select quiet areas with dimensions 40" × 1370" on the solar disk and an average line profile up to ~ 600 cases has been achieved. The obtained parameters of the line showed that in a quiet state the solar plasma is indeed in the thermodynamic equilibrium.

However, for the objects with a fairly strong magnetic field (floculi brightenings and sunspots), the observed profile of the H3.04 line turned out to be much wider and more complex than that calculated by Wild for a quiet Sun characterized by a very weak magnetic field. The calculation of the Zeeman effect for the hyperfine structure of the second level of the hydrogen atom showed that this effect results in splitting the H3.04 line into a number of additional components depending on the magnitude and direction of the magnetic field and generally leads to a significant change in the shape of the H3.04 profile. Comparison of the calculated profile with

the results of spectral observations of the Sun on the RATAN-600 radio telescope made it possible to estimate the magnitude of the magnetic field, which turned out to be ~ 200 Gs for floccule brightening.

Currently, RATAN-600 is the only tool which you can use to explore the H3.04 line with a fairly high frequency and angular resolution. But for the observations of non-stationary, insufficiently investigated objects and processes, such as coronal holes, prominences, coronal mass ejections, pre-flare depression of active region radio brightness, it is necessary to additionally increase the spectral resolution up to ~ 30 MHz with an analysis band of ~ 4 GHz, and at the first stage to use the observations with a high two-dimensional resolution of the order of the active region size (2–4 arcmin).

Keywords: Radio emission from the Sun, neutral hydrogen, radio line, magnetic fields, Zeeman effect.