

УДК 523.98-77

## О ВЫСОТНОЙ СТРУКТУРЕ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ НА СОЛНЦЕ В САНТИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

© 2013 В. М. Богод<sup>1,2</sup>, Л. В. Яснов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский филиал Специальной астрофизической обсерватории РАН, Санкт-Петербург, 196140 Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, 197101 Россия

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034 Россия

Поступила в редакцию 7 марта 2013 года; принята в печать 9 апреля 2013 года

В данной работе рассмотрен метод прямого измерения высот радиоизлучения активных областей при их нахождении на лимбе с целью построения высотной структуры магнитного поля в активных областях на Солнце. При этом анализируется положение радиосточников на сканах, получаемых по одномерным измерениям на радиотелескопе РАТАН-600 в сантиметровом диапазоне длин волн с высоким частотным разрешением. При наблюдениях радиосточников на лимбе при нулевом позиционном угле существуют трудности их выделения на многих частотах ввиду резко меняющегося сигнала на краю диска Солнца. Для исключения краевых эффектов на скане используются специальные периоды наблюдений (вблизи весеннего и осеннего равноденствий), когда источник, находящийся на лимбе, из-за больших позиционных углов оси Солнца в экваториальной системе координат расположен вдали от края скана. В результате построены спектры относительных высот для ряда источников за период с 2007 по 2012 гг. Продемонстрировано, что, как правило, высоты источников растут с увеличением длины волны. Разность высот на волнах 5 и 2 см составляет величину  $5.2 \pm 2.0$  Мм, разность высот на волнах 8 и 2 см —  $9.6 \pm 3.0$  Мм. Показано, что в рамках дипольного магнитного поля такие характеристики могут быть получены для диполя, погруженного под фотосферу на глубины 17 Мм независимо от величины возможной коррекции относительных высот к абсолютным.

Ключевые слова: *Солнце: магнитная топология—Солнце: атмосфера—солнечные пятна—Солнце: радиоизлучение*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Многие проблемы физики солнечной короны тесно связаны со знанием величины коронального магнитного поля, которое трудно измерять [1]. В связи с этим, многие авторы моделируют магнитное поле короны путем экстраполяции фотосферных наблюдений магнитного поля. Делается это, в основном, на основе потенциального и бессилового (линейного или нелинейного) приближения [2]. Трудность такого экстраполирования связана с тем, что нет уникального способа экстраполяции силового фотосферного магнитного поля до бессилового магнитного поля в короне. Проверки различных экстраполяций дают противоречивые результаты [3, 4]. Некоторые данные о магнитной петельной структуре могут быть получены из ряда ультрафиолетовых линий, однако яркость петель сама определяется магнитным полем [5]. Высотную зависимость напряженности магнитного поля можно

определять путем сравнения скоростей движения магнитных полей активных областей на фотосфере со скоростями перемещения выделенных деталей в излучении активных областей. Следует отметить многочисленные попытки измерить корональное магнитное поле с помощью радионаблюдений на отдельных длинах волн [6–14]. Однако, для определения высотной структуры магнитного поля в солнечной атмосфере необходимы одновременные наблюдения на многих волнах [15].

Оригинальный алгоритм оптимизации, использующий стереоскопический метод солнечного вращения, был разработан в работах [16, 17]. Он позволяет определять не только высотную зависимость напряженности магнитного поля, но и его пространственную структуру. Основным выводом, следующий из этих работ, заключается в том, что гирорезонансное излучение приходит от высот, которые превышают высоты генерации третьего

гироуровня, вычисленного методом магнитной экстраполяции. Это является необычным результатом для корональной магнитографии и требует дальнейшего изучения.

Отметим, что стереоскопический метод на основе вращения Солнца требует высокой стабильности излучения активной области в течении длительного времени (более суток), что часто невыполнимо [18]. Другая погрешность этого метода связана с возможным пространственным перераспределением излучения по источнику, которое зависит от изменения его местоположения на солнечном диске. Это обусловлено тем, что гирорезонансное излучение сильно зависит от угла между лучом зрения и направлением магнитного поля. Такое перераспределение может приводить к дополнительному сдвигу излучения по источнику при его перемещении по диску Солнца и тем самым приводить к ошибке определения высотной структуры магнитного поля.

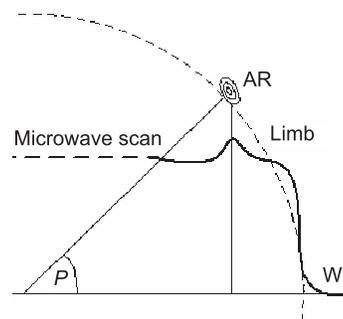
В связи с этим, поиск альтернативных методов определения высотной структуры радиоизлучения источников, свободных от перечисленных недостатков стереоскопических методов, является актуальным.

В данной работе рассматривается метод непосредственного измерения высотной структуры радиоисточников активной области при нахождении на лимбе при больших позиционных углах Солнца.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Несмотря на высокую координатную точность позиционного инструмента РАТАН-600 [19] задача определения точного положения радиоисточника на лимбе является сложной ввиду наличия высокого градиента антенной температуры. При измерениях на многих волнах эта задача еще более усложняется ввиду возможных диаграммных различий по частотному диапазону. Цель данной работы достичь максимально высокой относительной точности при измерении высотной структуры радиоисточника в активной области.

Для уменьшения влияния края Солнца на измерение положения источника были использованы наблюдения Солнца во времена, близкие к весеннему и осеннему равноденствию, когда абсолютное значение позиционного угла Солнца в азимутальной системе координат наибольшее. При этом во времена, близкие к осеннему равноденствию, анализировались источники, находящиеся на западном полушарии на северных гелиоширотах, а на восточном — на южных гелиоширотах. Во времена, близкие к весеннему равноденствию, ситуация менялась на противоположную. В этих случаях анализируемый лимбовый источник находится достаточно далеко от края записи



**Рис. 1.** К методике измерения положения центра радиоисточника в активной области, который реализуется одновременно на многих длинах волн сантиметрового диапазона.  $P$  — угол в азимутальной системе координат, под которым виден из центра Солнца лимбовый источник при наблюдении в меридиане.

Солнца (для одномерной диаграммы направленности радиотелескопа РАТАН-600) и, тем самым, не подвержен ошибкам, связанным с выделением источника на таком краю. На Рис. 1 проиллюстрирована такая методика выделения источников. Угловое расстояние источника на разных длинах волн переводится в расстояние на диске Солнца, затем это расстояние с учетом угла  $P$  переводится в разность высот источника. Отметим, что пока не представляется возможным с достаточной точностью определять абсолютное значение высоты источника. Это связано с целым рядом неопределенностей, связанных с неточным знанием положения диаграммы направленности относительно центра Солнца, неточным знанием координат проекции источника на фотосферу Солнца. Все это позволяет определять с высокой точностью (около 1 Мм) только относительное изменение высоты источника с изменением длины волны. Отметим также, что мы анализировали только интенсивные и изолированные источники.

На Рис. 2 приведены результаты измерения высот для ряда источников. Были проанализированы все источники последнего цикла активности, которые удовлетворяли выбранному принципу отбора. Также показаны результаты для двух источников, наблюдавшихся в конце предыдущего цикла солнечной активности (в 2007 г.). Обработка наблюдений проводилась с помощью автоматизированной системы,<sup>1</sup> при этом в регистрацию источников автоматически вписывались гауссианы нужного размера. В тех случаях, когда возникали заметные отклонения максимумов гауссиан от максимумов сигнала на скане вследствие разного рода помех, проводился “ручной” поиск максимумов сигнала

<sup>1</sup><http://www.spbf.sao.ru/prognoz/>

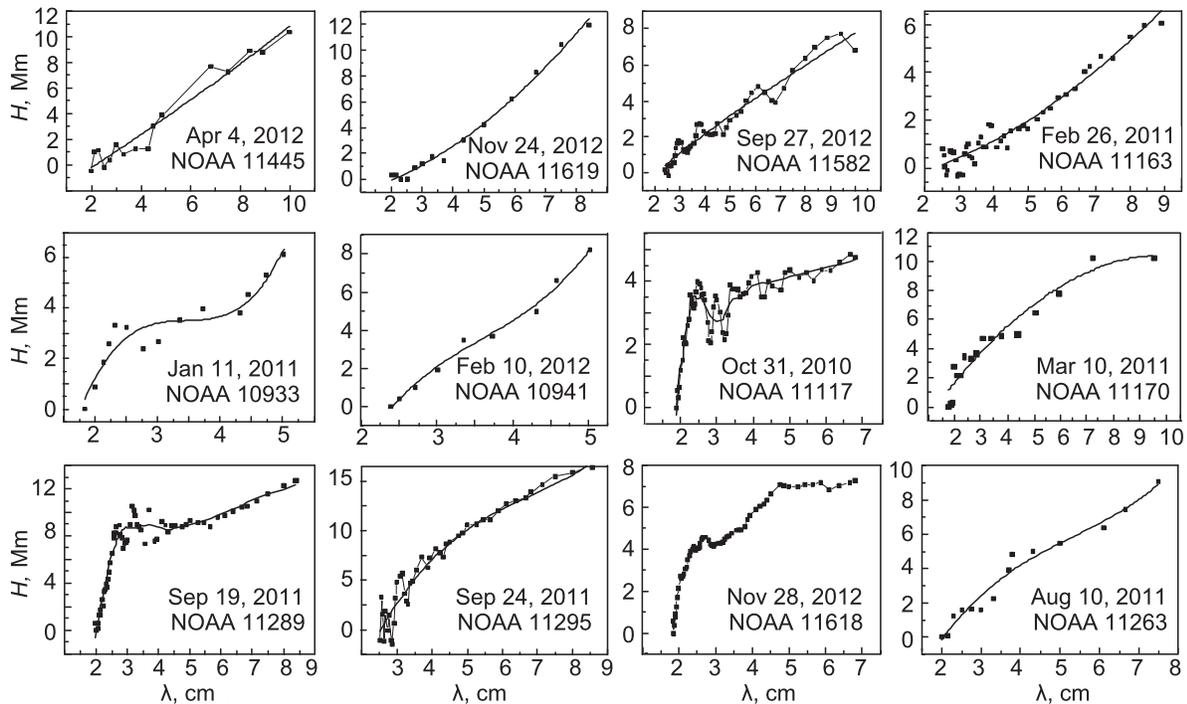


Рис. 2. Зависимости относительной высоты источника  $H$  от длины волны  $\lambda$ . За нулевое значение высоты принималась величина, соответствующая наименьшей длине волны.

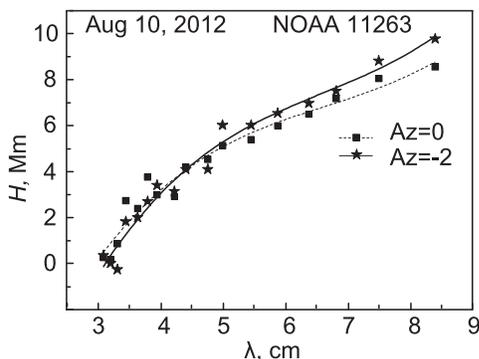


Рис. 3. Спектр относительных высот активной области NOAA 11263, полученный в азимутальных наблюдениях при азимутах  $Az=0^\circ$  и  $Az=2^\circ$ . Видно, что относительная ошибка определения высот составила величину около 1 Мм.

на записи источника. При этом обработка велась на меньшей частотной выборке сканов, что отразилось на разном количестве точек в высотных спектральных характеристиках для различных источников (см. Рис. 2).

На Рис. 3 приведены относительные высоты, которые измерены по наблюдениям в разных азимутах. Этот рисунок определяет относительную ошибку определения высот в пределах около 1 Мм. В целом, по результатам серии проведенных из-

мерений показано, что относительные высоты источников на волне 5 см находятся в пределах 1.5–8 Мм со средним значением  $5.2 \pm 2.0$  Мм, а высоты на волне 8 см находятся в пределах 5–15 Мм со средним значением  $9.6 \pm 3.0$  Мм.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ

На Рис. 4 построены спектры высот для активной области NOAA 11618 с использованием наблюдений параметров  $R$  и  $L$ , что соответствует необыкновенной и обыкновенной моде. Эти результаты показывают, что средняя относительная величина высоты в каналах  $R$  и  $L$  на коротких волнах около 3–3.5 Мм (Рис. 4а). Это означает, что шкала высот для спектра в канале  $I$  должна быть увеличена примерно на эту величину, что и сделано на Рис. 4б. Таким образом, не исключено, что и по другим источникам абсолютные значения высот должны быть увеличены по сравнению с относительными высотами на некоторую величину.

Если, как это и считается в теории циклотронного радиоизлучения активных областей на Солнце, будем полагать, что обыкновенная волна генерируется, в основном, на второй гармонике гирочастоты, а необыкновенная — на третьей гармонике гирочастоты, то для верхней атмосферы активной области NOAA 11618 можно оценить градиент магнитного поля. Из того факта, что высота растет достаточно быстро на коротких волнах, следует,

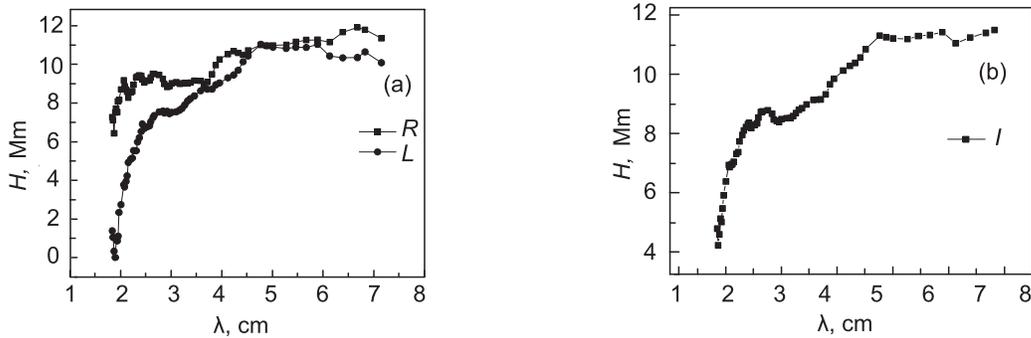


Рис. 4. Спектры относительных высот для активной области NOAA 11618 (28 ноября 2012 г.): (а) в каналах поляризации  $R$ ,  $L$ ; (б) в канале интенсивности  $I$ .

что мы имеем очень малый градиент магнитного поля (около  $100 \text{ Гс/Мм}$ ) на низких высотах (примерно до  $6 \text{ Мм}$ ). На больших высотах градиент магнитного поля существенно увеличивается (до  $400 \text{ Гс/Мм}$ ). Отметим, что малый градиент магнитного поля на низких высотах характерен и для активных областей NOAA 11289, 11117 и 10933, в то время как для других областей низкие высоты в этом смысле никак не выделены. В работе [17] было показано, что высота активной области NOAA 10956 на  $5 \text{ см}$  составляла величину в пределах  $13\text{--}18 \text{ Мм}$ , что почти в три раза превышает полученную здесь среднюю оценку относительной высоты ( $5.2 \text{ Мм}$ ). Абсолютная оценка высоты, как показано на примере NOAA 11618, должна быть увеличена, по крайней мере, на  $3\text{--}3.5 \text{ Мм}$ . К увеличению абсолютной высоты должен привести и эффект, связанный с экранированием излучения источников, находящихся на лимбе, в хромосфере спокойных областей Солнца. Принимая модель спокойной атмосферы по [11], получим оптическую толщину на лимбе Солнца по лучу зрения, приведенную на Рис. 5.

Из Рис. 5 видно, что источник может быть виден в излучении, если он имеет высоту более  $3 \text{ Мм}$ . Это приведет к увеличению абсолютной оценки высоты на  $5 \text{ см}$  до  $11 \text{ Мм}$ . Такая величина уже соответствует высоте третьего гирорезонансного уровня для магнитного поля, полученного в бессиловом приближении для NOAA 10956, но все-таки ниже измеренного значения высоты для этой области [17].

Представляет интерес получить характеристики дипольного магнитного поля, дающего измеренные нами высоты. Расчеты показывают, что указанные выше относительные высоты на  $5$  и  $8 \text{ см}$  получаются для диполя, погруженного под фотосферу на глубину  $17 \text{ Мм}$  и имеющего на фотосфере напряженность  $1700 \text{ Гс}$ . Если полагать абсолютную высоту больше относительной высоты

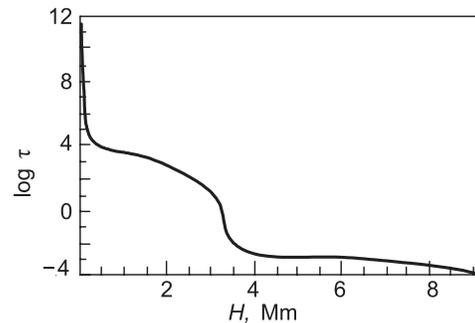


Рис. 5. Оптическая толщина  $\tau$  на лимбе Солнца по лучу зрения в зависимости от высоты  $H$  над оптическим диском.

на  $6 \text{ Мм}$ , то характеристики диполя будут следующими: глубина погружения остается той же самой, а напряженность поля на фотосфере —  $3000 \text{ Гс}$ . Таким образом, разность относительных высот однозначно дает глубину погружения диполя (в данном случае  $17 \text{ Мм}$ ) независимо от величины коррекции относительных высот к абсолютным. Это означает, что измерение относительных высот на лимбе методом многоволновых наблюдений на РАТАН-600 дает возможность получить одну из важнейших характеристик магнитного поля в дипольном приближении.

#### 4. ВЫВОДЫ

Рассмотрен метод прямого измерения высот радиоизлучения активных областей при их нахождении на лимбе с целью построения высотной структуры магнитного поля в активных областях на Солнце. При этом анализируется положение радиоисточников на сканах, получаемых по одномерным измерениям на радиотелескопе РАТАН-600 в сантиметровом диапазоне длин волн с высоким частотным разрешением. Для исключения краевых эффектов на скане используются специальные

периоды наблюдений (вблизи весеннего и осеннего равноденствий), когда источник, находящийся на лимбе, из-за больших позиционных углов оси Солнца в экваториальной системе координат расположен вдали от края скана. В результате построены спектры относительных высот для ряда источников за период с 2007 по 2012 гг. Показано, что разность высот на волнах 5 и 2 см составляет величину  $5.2 \pm 2.0$  Мм, разность высот на волнах 8 и 2 см —  $9.6 \pm 3.0$  Мм. Приведены причины, по которым абсолютная оценка высоты на волне 5 см может достигать величины в 11 Мм. Полученная разность относительных высот в рамках модели дипольного магнитного поля дает глубину погружения диполя в 17 Мм независимо от величины возможной коррекции относительных высот к абсолютным.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Данной работе была оказана финансовая поддержка в рамках гранта РФФИ 11-02-00072 и программ ПАН-22 и ПАН-4. Наблюдения на РАТАН-600 проводятся при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (госконтракт 14.518.11.7054).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. H. Lin, J. R. Kuhn, and R. Coulter, *Astrophys. J.* **613**, L177 (2004).
2. T. Wiegmann, *Solar Phys.* **219**, 87 (2004).
3. A. W. Sandman, M. J. Aschwanden, M. L. Derosa, et al., *Sol. Phys.* **259**, 1 (2009).
4. M. L. De Rosa, C. J. Schrijver, G. Barnes, et al., *Astrophys. J.* **696**, 1780 (2009).
5. Y. Mok, Z. Mikić, R. Lionello, and J. A. Linker, *Astrophys. J.* **679**, L161 (2008).
6. W. Graf and R. N. Bracewell, *Solar Phys.* **28**, 425 (1973).
7. Sh. B. Akhmedov, G. B. Gelfreikh, V. M. Bogod, and A. N. Korzhavin, *Solar Physics* **79**, 41 (1982).
8. K. A. Mursh and G. J. Hurford, *Ann. Rev. Astron. Astroph.* **20**, 497 (1982).
9. K. A. Lang, R. F. Wilson, and V. Gaizauskas, *Astrophys. J.* **267**, 455 (1983).
10. C. E. Alissandrakis and M. R. Kundu, *Astronom. and Astrophys.* **139**, 271 (1984).
11. K. Shibasaki, *Astrophys. and Space Sci.* **119**, 21 (1986).
12. M. J. Aschwanden and T. S. Bastian, *Astrophys. J.* **426**, 425 (1994).
13. M. J. Aschwanden and T. S. Bastian, *Astrophys. J.* **426**, 434 (1994).
14. M. J. Aschwanden, J. Lim, D. E. Gary, and J. A. Klimchuk, *Astrophys. J.* **454**, 512 (1995).
15. V. M. Bogod, A. M. Alesin, and A. A. Pervakov, *Astrophysical Bulletin* **66**, 205 (2011).
16. V. M. Bogod and L. V. Yasnov, *Astrophysical Bulletin* **64**, 372 (2009).
17. G. M. Nita, G. D. Fleishman, J. Jing, et al., *Astrophys. J.* **737**, 82 (2011).
18. V. M. Bogod, A. G. Stupishin, and L. V. Yasnov, *Solar Phys.* **276**, 61 (2012).
19. P. M. Afanas'eva and A. A. Pozhalov, *Astron. Tsirk.* **1378**, 7 (1985).
20. C. L. SelhorstA, Valio. Silva, and J. E. Costa, *Astronom. and Astrophys.* **488**, 1079 (2008).

## On Altitude Structure of Centimeter-Wave Radio Emission of Solar Active Regions

V. M. Bogod, L. V. Yasnov

A method is presented for the direct measurement of the heights of the radio emission of solar active regions when they are located at the limb in order to reconstruct the vertical structure of the magnetic field in solar active regions. The method involves an analysis of radio source positions in the scans based on high frequency resolution one-dimensional centimeter-wave measurements performed on the RATAN-600 radio telescope. Radio sources are difficult to identify at many frequencies when observed at the limb at zero position angle because of abrupt signal variations at the solar limb. To eliminate edge effects on the scan, special observing periods are used (near vernal and autumnal equinoxes), when the source at the limb is located far from the scan edge because of the large position angle of the Sun. As a result of these observations, the spectra of relative heights are constructed for a number of sources for the period from 2007 through 2012. Source heights are shown to generally increase with wavelength. The height difference between the 5 and 2 cm emission is equal to  $5.2 \pm 2.0$  Мм, and the corresponding height difference between the 8 and 2 cm emission is equal to  $9.6 \pm 3.0$  Мм. It is shown that such characteristics can be obtained for a field generated by a dipole submerged under the photosphere at a depth of 17 Мм irrespective of the possible reduction of relative altitudes to absolute altitudes.

Keywords: *Sun: magnetic topology—Sun: atmosphere—sunspots—Sun: radio radiation*